



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΜΟΣΠΙΝΘΗΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ
ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

ΘΑΝΑΣΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
Διδακτορική Διατριβή

Αθήνα 2010

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή
Ευάγγελος Γεωργίου, Καθηγητής
Λουκάς Σακελλίου, Αναπληρωτής Καθηγητής
Ευστάθιος Στυλιάρης, Επίκουρος Καθηγητής (κύριος επιβλέπων)

Ημερομηνία Παρουσίασης: 19 Νοεμβρίου 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Ευστάθιο Στυλιάρη για την συνεργασία στην εκπόνηση της Διδακτορικής μου Διατριβής τόσο για την βοήθειά του σε θεωρητικό υπόβαθρο, όσο και για την καθοδήγησή του σε οργανολογικό και σε software επίπεδο. Χωρίς τη βοήθεια του δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Λουκά Σακελλίου και τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Γεωργίου για το ενδιαφέρον, τα εύστοχα σχόλια και τις παρατηρήσεις τους σε καίριες στιγμές της εκπόνησης της διατριβής.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Μαϊντά, Διευθυντή του Ινστιτούτου Ισοτοπικών Μελετών του Ιατρικού Κέντρου Αθηνών, για την οικονομική και υλικοτεχνική συμβολή του μέσω του προγράμματος ΠΕΝΕΔ και για τις παρατηρήσεις του στις εργασίες που παρουσιάστηκαν στα συνέδρια που συμμετείχα.

Η παρουσία των μεταπτυχιακών φοιτητών στην ομάδα υπήρξε καταλυτική για την επιτυχή αντιμετώπιση της πληθώρας των προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αθανασία Πολυχρονοπούλου για την βοήθεια της κατά την έναρξη της διατριβής, την Μαρία Μικέλη για τη μελέτη των οπτικών προσομοιώσεων των κρυστάλλων σπινθηρισμών και γενικότερα για την συνεργασία της στην επεξεργασία πειραματικών δεδομένων, καθώς και τον Λεωνίδα Ραγκούση για τη συνεργασία που είχαμε στην βελτίωση των ικανοτήτων μας για την ανάπτυξη αλγορίθμων ανακατασκευής της πρωτογενούς πληροφορίας θέσης σε προβολικές εικόνες.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τόσο τον Πυρηνικό Ιατρό Δανήλ Χατζηφωτιάδη όσο και τον Ακτινοφυσικό Ηλία Τάτση του τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής του Γενικού Νοσοκομείου Αεροπορίας (Γ.Ν.Α) καθώς και τον Ακτινοφυσικό Ιωάννη Λασπά του τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής του Ιατρικού Κέντρου Αθηνών για την βοήθειά τους στην διάθεση ραδιενεργού διαλύματος ^{99m}Tc για την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων.

Θα πρέπει τέλος να αναφερθεί πως η παρούσα διδακτορική διατριβή υποστηρίχτηκε οικονομικά μέσω του προγράμματος ΠΕΝΕΔ 03ΕΔ287. Το έργο αυτό συγχρηματοδοτείται κατά 75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο, κατά 25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας καθώς και από τον Ιδιωτικό Τομέα (Ινστιτούτο Ισοτοπικών Μελετών) στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

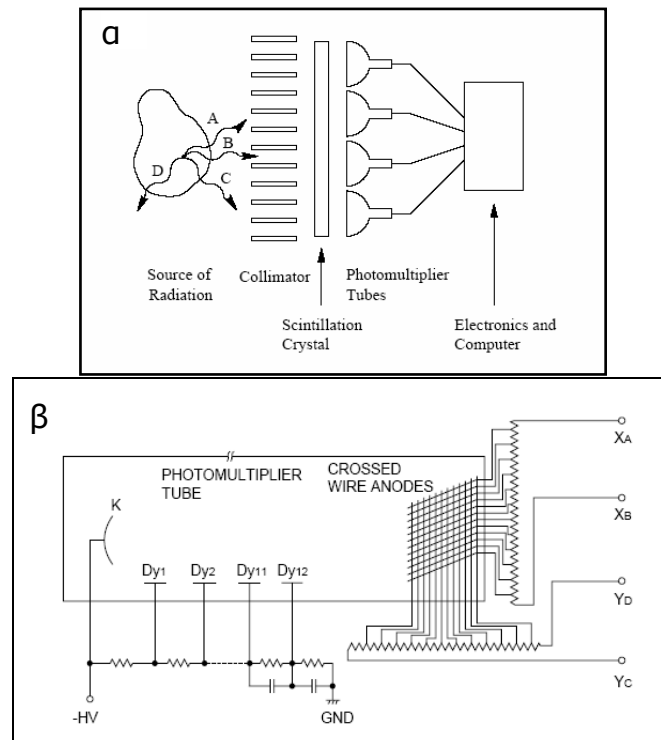
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1	Κατευθυντήρες στην Πυρηνική Ιατρική	5
	1.1 Περιγραφή της γεωμετρίας του κατευθυντήρα	5
	1.2 Περιγραφή των απεικονιστικών ιδιοτήτων του κατευθυντήρα	9
	1.3 Διαπερατότητα των διαφραγμάτων (septa)	13
	1.4 Δευτερογενείς περιορισμοί	15
	1.5 Μελέτη ιδιοτήτων κατευθυντήρων με προσομοιώσεις	18
	1.6 Κατευθυντήρας του συστήματος	27
Κεφάλαιο 2	Ανίχνευση Ακτινοβολίας – Σπινθηριστές	33
	2.1 Ανόργανοι σπινθηριστές	33
	2.2 Χαρακτηριστικά σπινθηριστών	35
	2.3 Ιδιότητες ανόργανων σπινθηριστών	37
	2.4 Ομογενείς - Διακριτοποιημένοι σπινθηριστές	43
Κεφάλαιο 3	Φωτοπολλαπλασιαστές	49
	3.1 Φωτοκάθοδος	50
	3.1.1 Βασικοί τύποι φωτοκαθόδων	50
	3.1.2 Παράθυρο εισόδου	51
	3.2 Ηλεκτρο-οπτικό σύστημα εισόδου	52
	3.2.1 Ηλεκτρικός πολλαπλασιαστής	53
	3.2.2 Υλικά δυνόδων	54
	3.2.3 Γεωμετρία δυνόδων	55
	3.3 Ανοδικός χώρος συλλογής	57
	3.4 Βασικά χαρακτηριστικά φωτοπολλαπλασιαστών	58
	3.4.1 Χαρακτηριστικά της φωτοκαθόδου	58
	3.5 Ρεύμα σκότους	64
	3.6 Χωρικά ευαίσθητος φωτοπολλαπλασιαστής	65
Κεφάλαιο 4	Σύνθεση της γ-Κάμερα	75
	4.1 Τεχνική διαίρεσης φορτίου	75
	4.2 Ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος	76
	4.3 Ανακατασκευή θέσης και ενέργειας	83
	4.4 Εξάρτηση προβολικής εικόνας από την ενίσχυση των φορτίων	85
	4.5 Εκτίμηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας	92
Κεφάλαιο 5	Μέθοδοι Διόρθωσης Χωρικών Παραμορφώσεων και Ανομοιογένειας Προβολικών Εικόνων	97
	5.1 Μέθοδος διόρθωσης της χωρικής παραμόρφωσης	97
	5.2 Μέθοδος διόρθωσης της ανομοιογένειας	101
	5.3 Εφαρμογή των μεθόδων διόρθωσης (χωρικής παραμόρφωσης και ανομοιογένειας) σε πειραματικά δεδομένα τύπου SPECT	103

Κεφάλαιο 6	Βελτιστοποίηση της Ανακατασκευής Θέσης σε Προβολικές Εικόνες Πολυανοδικών Συστημάτων γ-Κάμερα με Διαιρέτη Φορτίου	111
6.1	Εισαγωγή	111
6.2	Περιγραφή του μοντέλου	112
6.3	Εφαρμογή του μοντέλου σε πειραματικά δεδομένα	115
6.4	Εφαρμογή της νέας μεθόδου ανακατασκευής της θέσης σε συστήματα γ-Κάμερα με διαιρέτη φορτίου	123
Κεφάλαιο 7	Αξιολόγηση του Τελικού Συστήματος	131
7.1	Προβολικές λήψεις με διαφορετικές ενέργειες ιχνηθέτη	131
7.2	Λήψη πειραματικών δεδομένων τύπου SPECT (Υπολογιστικής Τομογραφίας)	135
7.3	Πείραμα τύπου SPECT με προσομοίωση στο GATE	142
Κεφάλαιο 8	Συμπεράσματα – Μελλοντικοί Στόχοι	145
8.1	Συμπεράσματα	145
8.2	Μελλοντικοί Στόχοι	148
Βιβλιογραφία	149

Εισαγωγή

Η καθιέρωση της συσκευής γ-Κάμερα στα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τον Hal Anger [ANG58] στην υπηρεσία της Πυρηνικής Ιατρικής έχει δημιουργήσει ένα πεδίο έρευνας και εφαρμογών, το οποίο παραμένει ενεργό μέχρι σήμερα. Η βασική αρχή λειτουργίας (Σχήμα 1α), αμετάβλητη στην αρχική της σύλληψη μέχρι σήμερα, περιλαμβάνει έναν κρυσταλλικό ανιχνευτή ακτίνων-γ μεγάλου πεδίου, οπτικά συνδεδεμένο με μια συστοιχία φωτοπολλαπλασιαστών, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός του σημείου αλληλεπίδρασης στον κρύσταλλο. Με τη χρήση ειδικών κατευθυντήρων για την επιλεκτική καταγραφή των γ-φωτονίων από προκαθορισμένη διεύθυνση του πεδίου εκπομπής γίνεται τελικά δυνατή η απεικόνιση της κατανομής του ραδιενεργού ιχνηθέτη στο εξεταζόμενο αντικείμενο.



Σχήμα 1: (α) Αρχή λειτουργίας συσκευής γ-Κάμερα τύπου Anger. (β) Η συστοιχία των φωτοπολλαπλασιαστών μπορεί να αντικατασταθεί με χωρικά ευαίσθητους φωτοπολλαπλασιαστές, οι οποίοι διαθέτουν ένα σύνθετο ανοδικό πλέγμα.

Η αρχική τεχνολογία της συσκευής Anger γ-Κάμερα έχει βελτιωθεί δραματικά στις μέρες μας. Η ανάπτυξη φωτοπολλαπλασιαστικών διατάξεων με πληροφορία θέσης, πέραν της συνήθους ενεργειακής, κατέστη δυνατή με την αντικατάσταση του απλού ανοδικού σήματος από σύνθετο πλέγμα με συστοιχία ανοδικών σημάτων (Σχήμα 1β). Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών και η γρήγορη ψηφιοποίηση των σημάτων του ανιχνευτή επέτρεψε την άμεση σύνδεση του ανιχνευτή με ηλεκτρονικούς υπολογιστές και κατά συνέπεια την άμεση καταγραφή, επεξεργασία και βελτίωση της απεικονιζόμενης πληροφορίας με διορθωτικούς

αλγόριθμους. Η τεχνική αυτή οδήγησε στις σύγχρονες συσκευές γ-Κάμερα που χρησιμοποιούνται σήμερα και οι οποίες στην βασική τους μορφή αποτελούνται από έναν κατευθυντήρα, ένα σπινθηριστή και συστοιχία φωτοπολλαπλασιαστών, ή ένα χωρικά ευαίσθητο φωτοπολλαπλασιαστή (Position Sensitive PhotoMultiplier Tube, PSPMT), συνδεδεμένους με υπολογιστή με το αντίστοιχο εξειδικευμένο λογισμικό. Σε ένα σύνθετο τομοσπινθηρογραφικό σύστημα μονοφωτονικής εκπομπής (Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT) μία ή περισσότερες συσκευές γ-Κάμερα περιστρέφονται γύρω από τον εξεταζόμενο. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από δύο σημαντικές παραμέτρους: την χωρική διακριτική ικανότητα και την ευαισθησία. Τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα συσκευών γ-Κάμερα που χρησιμοποιούνται στην κλινική πράξη έχουν το μειονέκτημα ότι παρουσιάζουν χαμηλή διακριτική ικανότητα (3-5mm στην προβολική απεικόνιση και 4-8mm στην τομογραφική) και χαμηλή ευαισθησία εξ αιτίας του μεγάλου οπτικού πεδίου, δεδομένου ότι έχουν κατασκευαστεί για μελέτες που αφορούν ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα και συνεπώς οι πληροφορίες που δίνουν στην απεικόνιση μικρών οργάνων είναι ανεπαρκείς.

Για το λόγο αυτό απαιτούνται εξειδικευμένα συστήματα για την απεικόνιση μικρών οργάνων τα οποία θα διαθέτουν βελτιωμένη διακριτική ικανότητα, καλύτερη ικανότητα προσαρμογής στην γεωμετρία της εκάστοτε εφαρμογής καθώς και αυξημένη απόδοση με μικρότερες χορηγούμενες δόσεις ραδιοφαρμάκων και συνεπώς μείωση της ακτινοβολήσης του ασθενούς. Τέτοια συστήματα συσκευών γ-Κάμερα μικρού οπτικού πεδίου έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί εργαστηριακά ευρέως τα τελευταία χρόνια ([KIM00], [POR02], [LOU03], [PAN03], [SAN06], [JEO04], [ZEN06], [TRO07]) μερικά των οποίων έχουν ελεγχθεί και σε κλινικό περιβάλλον ([POR02], [PAN04], [FER04]), παρουσιάζοντας αισθητά βελτιωμένη χωρική διακριτική ικανότητα (1.6mm–3.1mm) στην προβολική απεικόνιση [PAN97], [KIM00], [POR02].

Το σύστημα που αναπτύσσεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι ένα τομοσπινθηρογραφικό σύστημα γ-Κάμερα, μικρού οπτικού πεδίου αλλά υψηλής ευαισθησίας και διακριτικής ικανότητας, το οποίο αξιοποιεί σύγχρονες τεχνολογίες όπως διακριτοποιημένο κρύσταλλο σπινθηρισμών, χωρικά ευαίσθητο φωτοπολλαπλασιαστή, σύγχρονες ηλεκτρονικές διατάξεις συλλογής και επεξεργασίας σήματος και αλγόριθμους σύνθεσης και ανακατασκευής εικόνας. Το σύστημα εξασφαλίζει την απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα (καλύτερη του 1.0mm στην προβολική απεικόνιση και 2.0mm στην τομογραφική) ενώ η καινοτόμα ανάπτυξη της συλλογής των δεδομένων μέσω της τεχνικής διαίρεσης φορτίου και διαύλου PCI (Peripheral Component Interconnect) τοποθετημένου σε κοινό ηλεκτρονικό υπολογιστή καθιστούν εφικτή και με χαμηλό κόστος την μετακίνηση και εγκατάσταση του συστήματος σε οποιοδήποτε χώρο για κλινικές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν βέλτιστη χωρική διακριτική ικανότητα, όπως η μαστογραφία, για την πρόμνη

ανίχνευση καρκίνου του μαστού, η απεικόνιση λεμφαδένων και άλλων μικρών οργάνων του ανθρωπίνου σώματος, πέραν της παράλληλης μελέτης ραδιοφαρμάκων σε μικρά ζώα.

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από 8 κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στη χρήση των κατευθυντήρων. Αφού αναφερθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, διατυπώνεται η εξάρτηση της διακριτικής ικανότητας και ευαισθησίας του από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Η τελευταία μελετάται και σε επίπεδο προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας το λογισμικό GATE και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα θεωρητικά. Επίσης εκτιμάται το ποσοστό της ασκέδαστης και σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για διαφορετικές γεωμετρίες κατευθυντήρων. Τέλος, με τη χρήση ομοιώματος τριχοειδών σωλήνων, εκτελείται πείραμα στο σύστημα της γ-Κάμερα καθώς και με τη βοήθεια προσομοίωσης βασισμένης στο λογισμικό GATE και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στους κρυστάλλους-σπινθηριστές. Μετά την απαραίτητη θεωρία, μελετάται η διάδοση των οπτικών φωτονίων στο εσωτερικό των κρυστάλλων, ιδιαίτερα των διακριτοποιημένων, όπου τονίζονται τα πλεονεκτήματά τους έναντι των ομογενών. Η μελέτη αυτή βασίστηκε σε οπτικές προσομοιώσεις που έγιναν με το λογισμικό DETECT2000 και είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη σχετικού μοντέλου καλύτερου προσδιορισμού της θέσης, όπως αναφέρεται στα επόμενα.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στους φωτοπολλαπλασιαστές. Αρχικά αναφέρεται η αρχή λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά τους σε θεωρητικό επίπεδο. Ακολουθεί η περιγραφή των χωρικά ευαίσθητων φωτοπολλαπλασιαστών (Position Sensitive PhotoMultiplier Tubes – PSPMTs) και των διαφορών τους από τους απλούς φωτοπολλαπλασιαστές. Περιγράφεται ο PSPMT του εργαστηρίου του οποίου μελετώνται τα χαρακτηριστικά του, όπως η γραμμικότητα στη μέτρηση του φορτίου (με τη βοήθεια LED οπτικών παλμών), η μεταβολή της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας από την διάρκεια παλμών του LED και εκτιμάται η χωρική διακριτική ικανότητα του η οποία δίνει και το κάτω όριο του συστήματος.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στη σύνθεση όλων των τμημάτων σε ένα λειτουργικό σύστημα. Έτσι γίνεται αναφορά στην τεχνική διαίρεσης φορτίου που εφαρμόζεται στο ανοδικό πλέγμα του PSPMT και στην ψηφιοποίηση και καταγραφή των εξερχόμενων σημάτων χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό σε LabVIEW. Επίσης αναφέρεται ο αλγόριθμος της ανακατασκευής θέσης και ενέργειας μαζί με κατάλληλους διορθωτικούς παράγοντες. Τέλος βρίσκεται η βέλτιστη ενίσχυση των προενισχυτών και γίνεται μια πρώτη εκτίμηση της διακριτικής ικανότητας του συστήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια επίλυσης του πρόβληματος της εμφάνισης της βαρελοειδούς παραμόρφωσης και γενικά κάθε είδους παραμόρφωσης, τα οποία είναι κοινά στα συστήματα γ-Κάμερα μικρού οπτικού πεδίου ([JEO04], [PAN02], [FER04], [BAK05]). Η διόρθωση αυτή γίνεται με την offline εφαρμογή κατάλληλου αλγορίθμου ο οποίος χρησιμοποιεί τεχνικές παρεμβολής σε επίπεδο. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί δεδομένα που

λαμβάνονται κατά την βαθμονόμηση του συστήματος. Επιπλέον, το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται και στη διόρθωση της ανομοιογένειας προβολικών εικόνων η οποία γίνεται με την offline εφαρμογή αλγορίθμου ο οποίος βασίζεται σε πίνακα αντιστρόφων εντάσεων φωτονίων. Οι δύο αυτές τεχνικές εφαρμόζονται σε δεδομένα πειράματος SPECT τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται.

Στο έκτο κεφάλαιο αναπτύσσεται διεξοδικά μια πρωτότυπη μέθοδος ανακατασκευής της θέσης κάνοντας χρήση της πληροφορίας της κατανομής του φορτίου από πολυανοδικά συστήματα φωτοπολλαπλασιαστών. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται σε μια απλή μοντελοποίηση της κατανομής των οπτικών φωτονίων που παράγονται στο σπινθηριστή από τη γ-ακτινοβολία καθώς και του παραγόμενου φορτίου το οποίο συλλέγεται και καταγράφεται στο ανοδικό πλέγμα. Η επίλυση της αντίστροφης διαδικασίας, η οποία έχει αναπτυχθεί και λειτουργεί σε event-by-event βάση, καταφέρνει να προσδιορίσει τη θέση του προσπίπτοντος γ-φωτονίου με ακρίβεια καλύτερη των καθιερωμένων αλγορίθμων ανακατασκευής της θέσης όπως ο αλγόριθμος του κέντρου βάρους. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής και η εξάρτησή της από τα χαρακτηριστικά του σπινθηριστή και την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συζητούνται αναλυτικά.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταληκτικών μετρήσεων που έγιναν μετά την βελτιστοποίηση του συστήματος της γ-Κάμερα. Σκοπός των μετρήσεων αυτών είναι να ελεγχθεί το σύστημα ως προς την ποιότητα των εικόνων (προβολικών και τομογραφικών) που παράγει και ως προς την καταλληλότητα του να χρησιμοποιηθεί σε μετρήσεις οργάνων ασθενών μικρών διαστάσεων (όπως οι λεμφαδένες), στους οποίους έχει εισαχθεί κατάλληλο ραδιοφάρμακο. Για τον έλεγχο αυτό εκτελέστηκε κατάλληλο πείραμα SPECT, το ομοίωμα του οποίου αποτελούταν από ραδιενεργούς όγκους τοποθετημένους σε διάφορες θέσεις υδατικού διαλύματος gel το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο ιστού.

Τέλος στο κεφάλαιο 8 αναφέρονται τα καταληκτικά συμπεράσματα της διατριβής όπως επίσης και οι απαιτούμενες διεργασίες που πρέπει να γίνουν ώστε το σύστημα να γίνει φορητό και να είναι κατάλληλο για αξιολόγηση και μελλοντική κλινικό περιβάλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

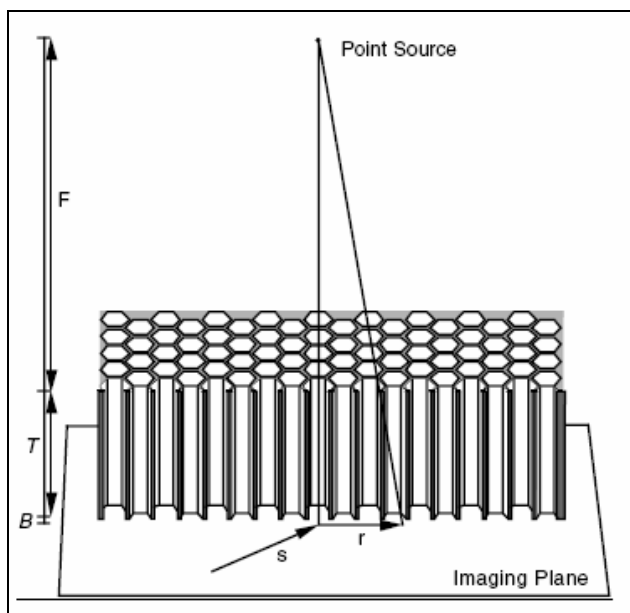
Κατευθυντήρες στην Πυρηνική Ιατρική

Ο κατευθυντήρας διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της εικόνας στις απεικονιστικές τεχνικές με γ -ραδιενεργά. Είναι μια κυψελοειδής διάταξη, από υλικό μεγάλης απορροφητικότητας στη γ -ακτινοβολία, συνήθως από μόλυβδο (Pb), με οπές διαφόρων σχημάτων και μεγεθών. Το τμήμα που παρεμβάλλεται μεταξύ των οπών ονομάζεται septum. Είναι προφανές ότι μόνο οι γ -ακτίνες οι οποίες διαπερνούν τον κατευθυντήρα και αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή συμβάλλουν στην παραγόμενη προβολική εικόνα. Σε γενικές γραμμές, για να διαπεράσει ένα γ -φωτόνιο έναν κατευθυντήρα ικανού πάχους πρέπει να πέσει σε κάποια οπή του και να κινηθεί σε τροχιά σχεδόν παράλληλη με τον κεντρικό άξονά της, όπως καθορίζεται από την αντίστοιχη γωνία αποδοχής. Με τον τρόπο αυτό απεικονίζεται στο επίπεδο του ανιχνευτή η οποιαδήποτε προβολική κατανομή του ραδιενεργού υλικού. Σε έναν συνήθη κατευθυντήρα μόνο 1 στα 10000 φωτόνια που προσπίπτουν στην επιφάνειά του τον διαπερνούν και φτάνουν στον ανιχνευτή. Συνεπώς ο κατευθυντήρας καθορίζει όχι μόνο την διακριτική ικανότητα του συστήματος, η οποία εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των οπών και το πάχος του, αλλά και το ποσοστό ανίχνευσης των εκπεμπόμενων ακτίνων, που ονομάζεται ευαισθησία, και η οποία βρίσκεται σε αντίστροφο συσχετισμό με την διακριτική του ικανότητα. Τα δύο αυτά μεγέθη συσχετίζονται άμεσα με τα κατασκευαστικά στοιχεία του κατευθυντήρα όπως το πάχος του, το πάχος του παρεμβάλλοντος υλικού (septum) και τη διάμετρο των οπών του. Κατά την εφαρμογή ενός κατευθυντήρα στην πράξη μπορούν να προκύψουν δευτερεύοντα προβλήματα όπως υψηλό ποσοστό διαπερατότητα της ακτινοβολίας μέσα από το διάφραγμα (septa) του, η έντονη εμφάνιση του πλέγματος των οπών του στην προβολική εικόνα, η μη αντοχή του βάρους του από την κεφαλή της γ -Κάμερα και η απεικόνιση μεγάλης ποσότητας σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στην προβολική εικόνα. Συνεπώς, πριν την κατασκευή συγκεκριμένου τύπου κατευθυντήρα εκτός από τον επιθυμητό συνδυασμό διακριτικής ικανότητας και ευαισθησίας, όλα τα δευτερεύοντα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν πρέπει να ληφθούν υπόψη από τον κατασκευαστή παράλληλα με την επιλογή των κατάλληλων τιμών των κατασκευαστικών του στοιχείων.

1.1. Περιγραφή της γεωμετρίας του κατευθυντήρα

Για την κατασκευή ενός κατευθυντήρα πρέπει να γνωρίζουμε 4 βασικές ιδιότητες του απεικονιστικού συστήματος (γ -Κάμερα) [GUN04]. Πρώτον, την ενέργεια E των εκπεμπόμενων φωτονίων του ραδιενεργού ιχνηθέτη, εφόσον η απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα διαφράγματα (septa) του κατευθυντήρα εξαρτάται άμεσα από αυτήν. Δεύτερον, την τυπική απόσταση F μεταξύ της ραδιενεργού πηγής και της πρόσθιας επιφάνειας του

κατευθυντήρα (Σχήμα 1.1). Τρίτον, την απόσταση B μεταξύ της όπισθεν επιφάνειας του κατευθυντήρα και του ανιχνευτή. Τέταρτον, την εσωτερική διακριτική ικανότητα του συστήματος $FWHM_{cam}$, δηλαδή τη διακριτική ικανότητα του κρυστάλλου-φωτοπολλαπλασιαστή μαζί με το σύστημα καταγραφής η οποία είναι και η βέλτιστη διακριτική ικανότητα του συστήματος. Σε γενικές γραμμές οι 4 αυτές παράμετροι (E , F , B και $FWHM_{cam}$) περιγράφουν το απεικονιστικό σύστημα και δεν μπορούν να καθοριστούν από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 1.1: Η γεωμετρία ενός τυπικού κατευθυντήρα παραλλήλων οπών. Διακρίνονται τα μεγέθη: πάχος κατευθυντήρα T , απόσταση πηγής-κατευθυντήρα F και απόσταση κατευθυντήρα-ανιχνευτή B . Το διάνυσμα s δίνει την προβολή της πηγής πάνω στο οριζόντιο επίπεδο αντίληψης. Το διάνυσμα r δίνει την απόσταση οποιουδήποτε σημείου του προβολικού επιπέδου σε σχέση με την προβολή της σημειακής πηγής στο επίπεδο του ανιχνευτή.

Ο κατασκευαστής καθορίζει το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατευθυντήρα. Τα υλικά που κυρίως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός κατευθυντήρα πρέπει να πληρούν 2 βασικές ιδιότητες: Πρώτον, πρέπει να έχουν υψηλό συντελεστή απορρόφησης μ για το φάσμα των ενεργειών E των φωτονίων του ραδιενεργού ιχνηθέτη, έτσι ώστε τα φωτόνια που προσπίπτουν στα διαφράγματα (septa) να απορροφούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους και να μην τα διαπερνούν. Την ιδιότητα αυτή την έχουν κυρίως υλικά υψηλής πυκνότητας και ατομικού αριθμού Z . Δεύτερον, κατά την αλληλεπίδραση των προσπιπτόντων φωτονίων με το υλικό του κατευθυντήρα πρέπει να παράγονται λίγα δευτερογενή φωτόνια, τα οποία αυξάνουν το θόρυβο της προβολικής εικόνας και υποβαθμίζουν την ποιότητα της. Συνεπώς πρέπει να κυριαρχεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και όχι το φαινόμενο Compton κατά τις αλληλεπιδράσεις των φωτονίων με το υλικό του κατευθυντήρα. Για τυπικές ενέργειες φωτονίων του ραδιενεργού ιχνηθέτη (80-511keV) το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ανάλογο του ατομικού αριθμού Z^n του υλικού (η

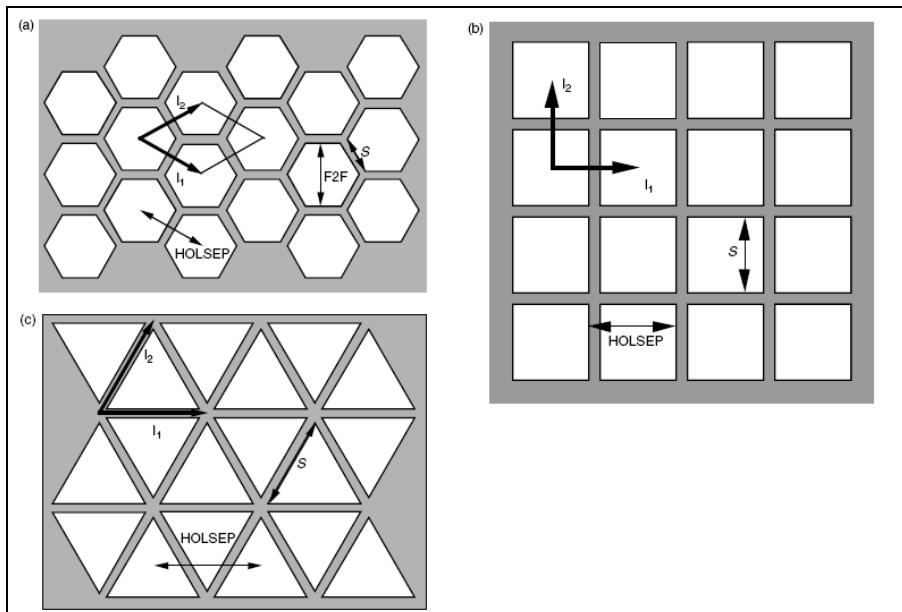
τιμή του εκθέτη n εξαρτάται από την ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων και παίρνει τιμές στο διάστημα [4,5]). Συνεπώς, ο μόλυβδος (Pb) είναι πολύ καλό υλικό για την κατασκευή κατευθυντήρων σε χαμηλές ενέργειες φωτονίων ($E < 230 \text{keV}$). Για υψηλότερες ενέργειες φωτονίων ($E > 230 \text{keV}$), και άλλα υλικά όπως το ατσάλι, ο χρυσός και το ταντάλιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή κατευθυντήρων αλλά το υψηλό κόστος ή/και άλλα κατασκευαστικά προβλήματα έχουν περιορίσει την εμπορική τους χρήση, με αποτέλεσμα τη σχεδόν αποκλειστική χρήση του μολύβδου (Pb) στην κατασκευή κατευθυντήρων.

Η γεωμετρία του κατευθυντήρα μπορεί να καθοριστεί από τον κατασκευαστή είτε καθολικά είτε τοπικά. Ο όρος «καθολικά» αναφέρεται στον προσανατολισμό και την διάταξη του συνόλου των οπών του κατευθυντήρα ενώ ο όρος «τοπικά» αναφέρεται στις γεωμετρικές διαστάσεις κάθε οπής ξεχωριστά όπως η διάμετρος της, το πάχος της και το πάχος του διαφράγματος (septum) της. Όσον αφορά στον καθολικό προσανατολισμό των οπών υπάρχουν 2 τύποι κατευθυντήρα: οι παραλλήλων οπών και οι συγκλινόντων οπών. Η πλειοψηφία των κατευθυντήρων που χρησιμοποιούνται και κατασκευάζονται είναι παραλλήλων οπών αλλά το σχήμα και η διάταξη των οπών τους ποικίλει. Από τους πιο συνήθεις τύπους κατευθυντήρων παραλλήλων οπών είναι οι κατευθυντήρες εξαγωνικών οπών, ενώ κατευθυντήρες τετραγωνικών, κυκλικών ή και τριγωνικών οπών επίσης χρησιμοποιούνται. Σε γενικές γραμμές, η επίδραση των χαρακτηριστικών των κατευθυντήρων παραλλήλων οπών στην απεικόνιση είναι γνωστή αν και ακόμα υπάρχουν κάποια προβλήματα κατά τη χρήση τους με ακτινοβολία γ -φωτονίων υψηλής ενέργειας. Τα περισσότερα και δυσκολότερα προβλήματα παρουσιάζονται στους κατευθυντήρες συγκλινόντων οπών, οι οποίοι όμως δεν θα μελετηθούν στο κεφάλαιο αυτό λόγω της περιορισμένης χρήσης τους και της μεγάλης δυσκολίας στην κατασκευή τους.

Οι κατευθυντήρες παραλλήλων οπών χαρακτηρίζονται από τη διάταξη των οπών τους και τρεις άλλες παραμέτρους. Στην εικόνα του Σχήματος 1.2 απεικονίζεται μια παράλληλη τομή, ως προς την πρόσοψή τους, 3 τυπικών κατευθυντήρων: (a) εξαγωνικών οπών σε εξαγωνική διάταξη, (b) τετραγωνικών οπών σε τετραγωνική διάταξη και (c) τριγωνικών οπών σε τριγωνική διάταξη. Επειδή η διάταξη με την οποία είναι τοποθετημένες οι οπές είναι περιοδική, τα δύο διανύσματα I_1 και I_2 αρκούν για να περιγράψουν θέση των οπών σε όλη την επιφάνεια του κατευθυντήρα. Εκτός από το σχήμα και τη διάταξη των οπών ενός κατευθυντήρα, τρία ακόμα μεγέθη αρκούν για τον χαρακτηρισμό πλήρως: (1) το πάχος T του κατευθυντήρα, (2) η απόσταση HOLSEP (Hole Separation) των κέντρων δύο διαδοχικών οπών του, και (3) το μέγεθος S της οπής. Το S συσχετίζεται με κάποια γραμμική διάσταση του σχήματος της οπής (πλευρά κανονικού σχήματος) του κατευθυντήρα. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην περίπτωση των τριγωνικών οπών γιατί η απόσταση HOLSEP πρέπει να μετρηθεί μεταξύ δύο διαδοχικών οπών ίδιου προσανατολισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα

1.2c. Εκτός του μεγέθους της οπής S μπορεί να οριστεί μια πιο πρακτική σχετική παράμετρος η οποία ονομάζεται διάμετρος της οπής D και ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Area of the hole} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \tag{1.1}$$



Σχήμα 1.2: Τρεις βασικοί τύποι κατευθυντήρων απεικονίζονται με τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη: α) εξαγωνικών οπών σε εξαγωνική διάταξη β) τετραγωνικών οπών σε τετραγωνική διάταξη και γ) τριγωνικών οπών σε τριγωνική διάταξη.

Η παράμετρος D (σχέση 1.1) περιγράφει την μέση γεωμετρική διάμετρο οπής οποιουδήποτε σχήματος και ισοδυναμεί με την διάμετρο υποθετικής κυκλικής οπής ίσου εμβαδού με την οπή του κατευθυντήρα. Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η σχέση μεταξύ των μεγεθών S και D για διάφορα σχήματα οπών. Το πάχος των διαφραγμάτων, SPT, μπορεί να υπολογιστεί γεωμετρικά από τα HOLSEP και D όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1. Έτσι τα 3 μεγέθη (T, D, HOLSEP) περιγράφουν πλήρως τον κατευθυντήρα. Προφανώς ισχύει:

$$T > 0, D > 0, HOLSEP > 0, SPT > 0 \tag{1.2}$$

Parameter\Hole Shape	Triangular Holes	Square Holes	Hexagonal Holes
Diameter (D)	$D = \frac{\sqrt[4]{3}}{\sqrt{\pi}} S = 0.7425 S$	$D = \frac{2}{\sqrt{\pi}} S = 1.128 S$	$D = \frac{\sqrt[4]{108}}{\sqrt{\pi}} S = 1.819 S$
Area of lattice cell	$\frac{\sqrt{3}}{2} HOLSEP^2$	$HOLSEP^2$	$\frac{\sqrt{3}}{2} HOLSEP^2$
Septal thickness (SPT)	$\left(\frac{1}{\sqrt{3}} HOLSEP - \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt[4]{27}} D \right)$	$\left(HOLSEP - \frac{\sqrt{\pi}}{2} D \right)$	$\left(HOLSEP - \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt[4]{12}} D \right)$
Sensitivity (S)	$\frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\pi D^4}{64 T^2 HOLSEP^2}$	$\frac{\pi D^4}{64 T^2 HOLSEP^2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\pi D^4}{64 T^2 HOLSEP^2}$

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός κατευθυντήρα για διάφορα σχήματα οπών.

Επειδή το κριτήριο για την κατασκευή ενός κατευθυντήρα, εκτός από την επιλογή ενός συνδυασμού (T, D, HOLSEP), είναι κυρίως οι απεικονιστικές του ιδιότητες (ευαισθησία και διακριτική ικανότητα) πρέπει να γνωρίζουμε την σχέση των ιδιοτήτων αυτών με τα μεγέθη (T, D, HOLSEP).

1.2. Περιγραφή των απεικονιστικών ιδιοτήτων του κατευθυντήρα

Για την πλήρη περιγραφή των απεικονιστικών ιδιοτήτων ενός κατευθυντήρα απαιτείται λεπτομερής μέτρηση της συνάρτησης απόκρισης σημειακής πηγής (PSRF – Point Spread Response Function). Η PSRF περιγράφει την προβολική εικόνα που παράγεται από σημειακή πηγή και είναι για δοσμένο κατευθυντήρα συνάρτηση της θέσης της πηγής. Η θέση της πηγής περιγράφεται από ένα τρισδιάστατο διάνυσμα, το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες της, αλλά στην πράξη δίνεται ένα δισδιάστατο διάνυσμα \mathbf{s} το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες της πηγής πάνω στο προβολικό επίπεδο απεικόνισης και η απόστασή της z ($z=F+T+B$) από το επίπεδο απεικόνισης (Σχήμα 1.1). Έστω ότι η θέση οποιουδήποτε σημείου της προβολικής εικόνας δίνεται από το δισδιάστατο διάνυσμα \mathbf{x} . Τότε το σημείο $\mathbf{x}=\mathbf{s}$ αντιστοιχεί στην προβολή της πηγής πάνω στο επίπεδο ανίχνευσης. Στο σημείο αυτό αναμένεται η τιμή του αριθμού των καταγραφόμενων φωτονίων να είναι μέγιστη και συνεπώς μέγιστη να είναι και η τιμή της PSRF. Συνεπώς το διάνυσμα $\mathbf{r}=\mathbf{x}-\mathbf{s}$ είναι πιο χρήσιμο για τον καθορισμό συντεταγμένων στο προβολικό επίπεδο και δηλώνει την απόσταση οποιουδήποτε σημείου της προβολικής απεικόνισης από το σημείο μέγιστης τιμής της PSRF. Έτσι η PSRF ορίζεται ως:

$$\text{PSRF} = [\text{Αριθμός των γεγονότων/cm}^2 \text{ που ανιχνεύονται σε σημείο } \mathbf{x}=(\mathbf{s}+\mathbf{r}) \text{ στο προβολικό επίπεδο από μια σημειακή πηγή τοποθετημένη στο } (\mathbf{s}, z)] / [\text{Αριθμός των γεγονότων που εκπέμπονται από σημειακή πηγή τοποθετημένη στο } (\mathbf{s}, z)] \quad (1.3)$$

και έχει μονάδες (cm^{-2}). Η σύγκριση των PSRF δύο κατευθυντήρων είναι πολύ δύσκολη γιατί εξαρτάται από 5 μεταβλητές (από τα δύο δισδιάστατα διανύσματα \mathbf{s} και \mathbf{r} και την απόσταση z). Για κατευθυντήρες παραλλήλων οπών η PSRF είναι περιοδική γιατί μεταθέσεις από τη μια οπή στην επόμενη δεν επηρεάζουν ενός απεικονιστικές ιδιότητες του συστήματος. Έτσι μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$\text{PSRF}(\mathbf{r}, \mathbf{s}+m\mathbf{I}_1+n\mathbf{I}_2, z) = \text{PSRF}(\mathbf{r}, \mathbf{s}, z) \quad (1.4)$$

όπου m και n ακέραιοι. Χωρίς απώλεια πληροφορίας μπορούμε να πάρουμε το μέσο όρο της PSRF μιας οπής του κατευθυντήρα και να ορίσουμε την συνάρτηση ψ :

$$\psi(r, z) = \int_0^1 dt_1 \int_0^1 dt_2 \text{PSRF}(r, t_1 I_1 + t_2 I_2, z) \quad (1.5)$$

Έτσι το διάνυσμα της θέσης της πηγής \mathbf{s} απαλείφεται και η συνάρτηση $\psi(\mathbf{r}, z)$ εξαρτάται από 3 μεταβλητές. Θεωρώντας την απόσταση z σταθερή ($z=F+T+B$) τότε η συνάρτηση ψ

εξαρτάται από το δισδιάστατο διάνυσμα \mathbf{r} , δηλαδή από δύο μεταβλητές. Περαιτέρω μείωση του αριθμού των μεταβλητών από τις οποίες εξαρτάται η συνάρτηση ψ δεν είναι δυνατή εξαιτίας της μη περιστροφικής συμμετρίας του κατευθυντήρα. Όμως, επειδή η PSRF εξαρτάται πολύ περισσότερο από το μέτρο του \mathbf{r} και όχι από τη διεύθυνση του, προκύπτει ότι η PSRF για συγκεκριμένη απόσταση z εξαρτάται από μια μόνο μεταβλητή, το μέτρο του διανύσματος r . Δηλαδή $f(r) = \psi(r \cdot \mathbf{e}_1)$. Παρά τις αποδοχές που έχουν γίνει μπορούμε να πούμε ότι η συνάρτηση f είναι ενδεικτική και χαρακτηρίζει κάθε κατευθυντήρα. Όμως εξακολουθεί να είναι πολύ περίπλοκη η χρήση της για σύγκριση διαφορετικών κατευθυντήρων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τα μεγέθη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα τα οποία εύκολα υπολογίζονται και βασίζονται στις πιο σημαντικές ιδιότητες της PSRF.

Η **ευαισθησία** $\$$ του κατευθυντήρα ορίζεται ως ο λόγος των εκπεμπόμενων φωτονίων που περνούν μέσα από τον κατευθυντήρα προς τα συνολικά φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή. Έτσι μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$\$(s,z) = \frac{[\text{Αριθμός των φωτονίων που διαπερνούν τον κατευθυντήρα} / \text{Αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται από σημειακή πηγή τοποθετημένη στο } (s, z)]$$

$$\text{ή} \quad \$(s, z) = \iint dr^2 PSRF(r, s, z) \quad (1.6)$$

Είναι προφανές ότι η ευαισθησία εξαρτάται από την θέση της πηγής οπότε για να συγκριθούν κατευθυντήρες ως προς την ευαισθησία τους πρέπει να διατηρείται σταθερή η θέση της πηγής. Επιπλέον ισχύει ότι $0 \leq \$ \leq 0.5$. Η ευαισθησία δεν μπορεί να περάσει την τιμή 0.5 γιατί τα μισά από τα φωτόνια που εκπέμπονται έχουν κατεύθυνση αντίθετη από αυτή προς την οποία βρίσκεται ο κατευθυντήρας. Στην πράξη η ευαισθησία παίρνει πολύ μικρές τιμές, της τάξεως μερικών 10^{-4} . Ο παραπάνω ορισμός της ευαισθησίας (η οποία αναφέρεται και ως γεωμετρική ευαισθησία) δεν χρησιμοποιείται στην κλινική εφαρμογή όπου έχουμε χορηγήσεις δόσεων σε ασθενείς της τάξεως του mCi. Αντ' αυτής χρησιμοποιείται μια πρακτικότερη μονάδα, η ευαισθησία c , η οποία είναι ο αριθμός των φωτονίων που διαπερνούν τον κατευθυντήρα ανά λεπτό ανά μCi για μια συγκεκριμένη πηγή και μετριέται σε $\text{cpm}/\mu\text{Ci}$. Μεταξύ $\$$ και c ισχύει η σχέση $c = 2.22 \cdot 10^6 \cdot \$$. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην περίπτωση που έχουμε β^+ ραδιενεργό ιχνηθέτη. Εξαιτίας του φαινομένου της εξαύλωσης του ποζιτρονίου με ηλεκτρόνιο έχουμε 2 αντιδιαμετρικά φωτόνια να παράγονται σε κάθε διάσπαση οπότε η $\$$ παραμένει αμετάβλητη γιατί περιλαμβάνει τον αριθμό των εκπεμπόμενων φωτονίων, ενώ η c διπλασιάζεται γιατί το Ci ορίζεται ως διασπάσεις/sec αφού σε κάθε διάσπαση β^+ παράγεται τελικώς 2 φωτόνια. Για το λόγο αυτό, στην κατασκευή των κατευθυντήρων είναι προτιμότερη η $\$$ από τη c .

Για κατευθυντήρες παραλλήλων οπών ο ορισμός της ευαισθησίας (σχέση 1.6) μπορεί να απλοποιηθεί. Λαμβάνοντας υπόψη την περιοδική δομή των οπών του, η μέση ευαισθησία ισούται με:

$$\langle \$ \rangle = \int_0^1 dt_1 \int_0^1 dt_2 \$ (t_1 I_1 + t_2 I_2, z) \quad (1.7)$$

Η παραπάνω σχέση (1.7) φανερώνει ότι η μέση ευαισθησία εξαρτάται μόνο από την απόσταση z της πηγής από την επιφάνεια του ανιχνευτή και όχι από την θέση της προβολής της στην ανιχνευτική επιφάνεια. Αυτή η διαπίστωση είναι πολύ σημαντική. Όταν ένα φωτόνιο φτάσει στην επιφάνεια του κατευθυντήρα, το κριτήριο για το αν τον διαπεράσει ή όχι (στην περίπτωση που αυτό συναντήσει οπή και όχι διάφραγμα) είναι το ποια είναι η γωνία πρόσπτωσης του σε σχέση με την γωνία αποδοχής. Φωτόνια με ορμές που να σχηματίζουν γωνίες μεγαλύτερες της γωνίας αποδοχής απορροφώνται από τα διαφράγματα (septa) ενώ για μικρότερες γωνίες της γωνίας αποδοχής αυτά περνάνε και φτάνουν στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Στην περίπτωση κατευθυντήρα παραλλήλων οπών οι κύριοι άξονες όλων των οπών του είναι παράλληλοι μεταξύ τους με αποτέλεσμα το ποσοστό των φωτονίων που διαπερνούν τον κατευθυντήρα άρα και η ευαισθησία του να μην εξαρτάται από την θέση της προβολής της στη επιφάνεια του κατευθυντήρα. Η μόνη εξαίρεση στην ιδιότητα αυτή είναι όταν η πηγή βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε η προβολή της στην επιφάνεια του κατευθυντήρα να βρίσκεται κοντά στα άκρα του οπτικού πεδίου του συστήματος. Έτσι αποδεικνύεται μαθηματικά [GUN06], στην περίπτωση κατευθυντήρα παραλλήλων οπών, ότι:

$$\langle \$ \rangle = \frac{\sum_i [Area \ of \ hole \ (i)]^2}{4\pi T^2 [Area \ of \ lattice \ cell]} \quad (1.8)$$

όπου i ο αριθμός των οπών ανά κυψελίδα. Για εξαγωνικές και τετραγωνικές οπές, κάθε πλεγματοειδές κελί περιέχει μία μόνο οπή δηλαδή η μέγιστη τιμή του i είναι ίση με 1 στην σχέση (1.8). Όμως στην περίπτωση τριγωνικών οπών, δύο οπές περιέχονται σε κάθε πλεγματοειδές κελί, οπότε η μέγιστη τιμή του i είναι ίση με 2. Επίσης η σχέση (1.8) μετασχηματίζεται στην:

$$\langle \$ \rangle = C_{hole \ shape} \frac{\pi D^4}{64T^2 [HOLSEP]^2} \quad (1.9)$$

Όπου ο παράγοντας $C_{hole \ shape}$ λαμβάνει για τις συνήθεις γεωμετρικές οπών τις τιμές:

$$C_{square} = 1.0, \quad C_{hex} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1.155, \quad C_{triangle} = \frac{4}{\sqrt{3}} \approx 2.309 \quad (1.10)$$

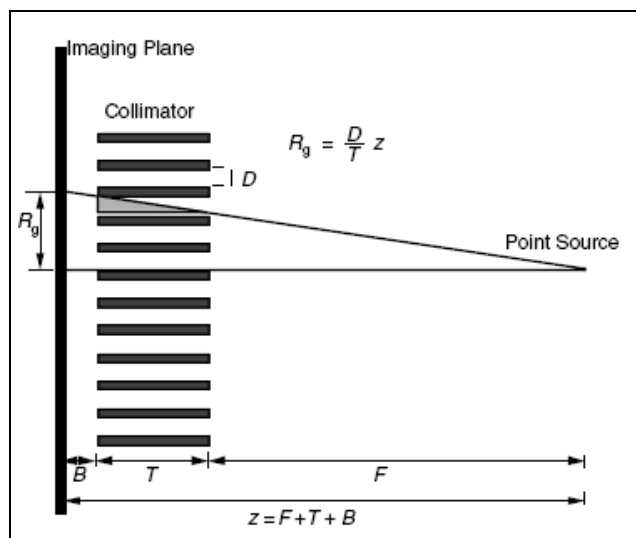
Πρέπει να σημειώσουμε ότι αν όλες οι διαστάσεις ενός κατευθυντήρα (T, F, HOLSEP) πολλαπλασιαστούν με έναν σταθερό αριθμό (παράγοντας κλίμακας), τότε η μέση τιμή της ευαισθησίας παραμένει σταθερή.

Ως **διακριτική ικανότητα** ορίζεται η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο πηγών για την οποία αυτές μπορούν να διαχωριστούν κατά την απεικόνιση τους. Η ελάχιστη μεταξύ τους απόσταση για την οποία διαχωρίζονται, εξαρτάται πρωτίστως από την απόστασή τους από την επιφάνεια του ανιχνευτή. Έτσι για έναν συγκεκριμένο τύπο κατευθυντήρα, χρειάζεται και η απόσταση F πηγής-κατευθυντήρα να είναι γνωστή για να αξιολογηθεί η διακριτική του ικανότητα. Μπορεί να αποδειχθεί ότι για συγκεκριμένη απόσταση z πηγής-ανιχνευτή η συνάρτηση ψ είναι γκαουσιανή συνάρτηση του διανύσματος r. Δηλαδή:

$$PSRF(r, s, z) = \psi(r, z) \propto \exp\left[-\frac{4 \ln 2 |r|^2}{FWHM_{col}^2}\right] \quad (1.11)$$

Συνεπώς η PSRF μπορεί να χαρακτηριστεί από μια παράμετρο $FWHM_{col}$ για μια σημειακή πηγή σε απόσταση z από την επιφάνεια του ανιχνευτή (ή απόσταση F από την επιφάνεια του κατευθυντήρα). Η $FWHM_{col}$ είναι η διακριτική ικανότητα του κατευθυντήρα. Δύο πηγές σε απόσταση μικρότερη από την $FWHM_{col}$ (διατηρώντας την απόσταση F σταθερή) δεν μπορούν να διαχωριστούν.

Με την γκαουσιανή προσέγγιση της PSRF το $FWHM_{col}$ μπορεί να προσεγγιστεί και να υπολογιστεί πολύ εύκολα από την γεωμετρική διακριτική ικανότητα R_g όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Υπολογισμός της γεωμετρικής διακριτικής ικανότητας R_g ενός κατευθυντήρα βασισμένου στην ευθύγραμμη διάδοση των γ-φωτονίων.

Η γεωμετρική διακριτική ικανότητα του κατευθυντήρα R_g , κάνοντας την παραδοχή ότι καμία ακτίνα δεν διαπερνά τα διαφράγματα του κατευθυντήρα, ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$R_g(F) = \frac{D}{T} z = \frac{D}{T} (T + B + F) \square \frac{D}{T} F \quad (1.12)$$

Η γεωμετρική διακριτική ικανότητα R_g φαίνεται ότι παραμένει σχεδόν σταθερή αν μεταβληθούν, υπό κλίμακα, οι διαστάσεις του γιατί ο λόγος D/T θα μείνει σταθερός. Άρα ισχύει και στην περίπτωση της διακριτικής ικανότητας (όπως και στην ευαισθησία) η ιδιότητα αυτή. Για κατευθυντήρες παραλλήλων οπών η R_g είναι μια καλή προσέγγιση του $FWHM_{col}$ γιατί (για κάθε σχήματος οπή) ισχύουν:

$$R_g \cdot FWHM_{col} < 2R_g \quad (1.13)$$

$$FWHM_{col} = K_{hole\ shape} \frac{D}{T} z = K_{hole\ shape} \frac{D}{T} (T + B + F) \quad (1.14)$$

όπου $K_{hole\ shape}$ είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται μόνο από το σχήμα της οπής και ισχύει:

$$1 \leq K_{hole\ shape} \leq 2 \quad (1.15)$$

Το πιο σημαντικό συμπέρασμα των προηγούμενων υπολογισμών είναι ότι το $FWHM_{col}$ αυξάνεται γραμμικά με το z . Για το λόγο αυτό, αναφέροντας τη διακριτική ικανότητα $FWHM_{col}$ ενός κατευθυντήρα, πρέπει πάντα να αναφέρεται και η απόσταση z (ή η F) για την οποία μετρήθηκε αυτή.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.9) και (1.14) έχουμε ότι:

$$\langle \$ \rangle = \frac{C_{hole\ shape}}{K_{hole\ shape}^2} \left(\frac{\pi D^2}{64 [HOLSEP]^2} \right) \left[\frac{FWHM_{col}}{z} \right]^2 \quad (1.16)$$

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνουμε ότι η ευαισθησία $\$$ μπορεί να αυξηθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι μειώνοντας το HOLSEP δηλαδή το πάχος των διαφραγμάτων (septa), οπότε θα αυξηθεί η διαπερατότητα τους, δηλαδή θα αυξηθεί το ποσοστό των φωτονίων που τα διαπερνούν. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να αποφεύγεται γιατί υποβαθμίζεται σε μεγάλο βαθμό η ποιότητα της προβολικής εικόνας αφού αυξάνεται ο θόρυβός της. Ο δεύτερος τρόπος είναι αυξάνοντας την τιμή του $FWHM_{col}$, υποβαθμίζοντας δηλαδή τη διακριτική ικανότητα του συστήματος. Αυτή η σχέση (αντίστροφη αναλογία) μεταξύ διακριτικής ικανότητας και ευαισθησίας είναι πολύ γνωστή, ισχύει για κάθε κατευθυντήρα παραλλήλων οπών και μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\langle \$ \rangle \propto FWHM_{col}^2 \quad (1.17)$$

1.3. Διαπερατότητα των διαφραγμάτων (septa)

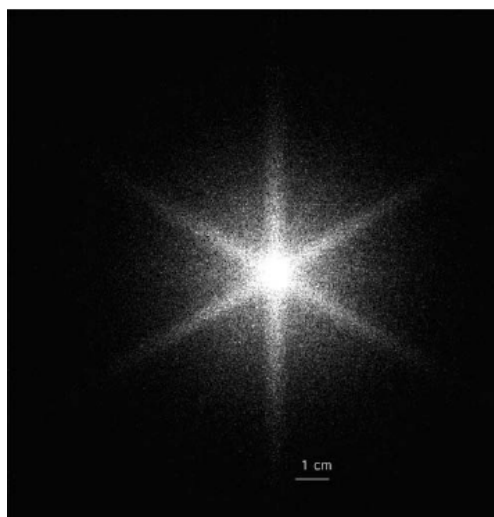
Όλα τα αποτελέσματα στο προηγούμενο κεφάλαιο βασίζονταν στην παραδοχή ότι όλα τα φωτόνια που προσπίπτουν στα διαφράγματα (septa) απορροφούνται από αυτά και δεν τα διαπερνούν. Στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει. Αν και η ευαισθησία του κατευθυντήρα αυξάνεται όσο το πάχος των διαφραγμάτων μειώνεται, η διαπερατότητα των φωτονίων μέσα

από αυτά αυξάνεται. Τα φωτόνια που διαπερνούν τα διαφράγματα και απορροφούνται από τον ανιχνευτή δεν συνεισφέρουν στο κεντρικό τμήμα της PSRF (ή αντίστοιχα της ψ) αλλά στην ουρά της με αποτέλεσμα να αυξάνεται το υπόβαθρο της εικόνας και να μειώνεται η αντίθεση της.

Με μια γρήγορη προσέγγιση, θα ήταν αναμενόμενο ότι η διαπερατότητα θα αύξανε το FWHM, υποβαθμίζοντας την διακριτική ικανότητα του κατευθυντήρα. Όμως τέτοιο αποτέλεσμα δεν παρατηρείται εκτός εάν η διαπερατότητα του κατευθυντήρα είναι εξαιρετικά υψηλή. Αυτό συμβαίνει γιατί η διαπερατότητα συνεισφέρει σε αποστάσεις μεγαλύτερες του FWHM (στην ουρά της PSRF) και δεν επηρεάζει ούτε το FWHM ούτε το ύψος της PSRF. Συνεπώς απαιτείται η εισαγωγή μιας άλλης παραμέτρου για την ποσοτικοποίηση της διαπερατότητας. Αυτή η παράμετρος είναι το FWTM (Full Width at Tenth Maximum). Για έναν ιδανικό κατευθυντήρα μηδενικής διαπερατότητας ισχύει:

$$R_g < FWHM < FWTM < 2R_g \quad (1.18)$$

Όταν το FWTM είναι μεγαλύτερο από το διπλάσιο του FWHM έχουμε σαφή ένδειξη ύπαρξης έντονης διαπερατότητας. Εκτός του FWTM πρέπει να ληφθούν υπόψη και δύο επιπλέον παράμετροι. Πρώτον, η διαπερατότητα δεν εμφανίζεται ισοτροπικά στις προβολικές εικόνες. Εξαρτάται από το πάχος των διαφραγμάτων που συναντούν κατά τη διέλευσή τους μέσα από αυτά. Το πάχος αυτό εξαρτάται από τη γωνία εκπομπής των φωτονίων. Φωτόνια που πέφτουν στα διαφράγματα με μικρές γωνίες είναι πιο πιθανό να απορροφηθούν από αυτά, ενώ με μεγάλες γωνίες είναι πιο πιθανό να τα διαπεράσουν. Το αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι η εμφάνιση υποβάθρου σχήματος αστεριού όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Προβολική εικόνα ύστερα από ακτινοβολήση με σημειακή πηγή ^{131}I (365keV) χρησιμοποιώντας έναν τυπικό κατευθυντήρα υψηλής διακριτικής ικανότητας για χαμηλότερες ενέργειες των 140keV. Φαίνεται το υπόβαθρο σχήματος αστεριού που προκύπτει από την διαφορετική διαπερατότητα για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης των φωτονίων στα διαφράγματα [GUN04].

Κατευθυντήρες με εξαγωνικές ή τετραγωνικές οπές είναι πιο ευάλωτοι στα φαινόμενα αυτά. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων τόσο ισχυρότερο είναι το φαινόμενο της διαπερατότητας. Δεύτερον, ο υπολογισμός του FWTM από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατευθυντήρα είναι πολύ δύσκολος. Οποιαδήποτε κριτήρια για τα όρια αποδοχής της διαπερατότητας έχουν χρησιμοποιηθεί είναι συχνά ανακριβή.

1.4. Δευτερογενείς περιορισμοί

Οι βασικοί δευτερογενείς περιορισμοί που προκύπτουν κατά τη χρήση ενός κατευθυντήρα προκύπτουν κυρίως από προβλήματα που οφείλονται: (Α) στο μέγιστο βάρος του κατευθυντήρα που μπορεί να αντέξει το σύστημα της γ-Κάμερα, (Β) στο ελάχιστο πάχος των διαφραγμάτων (septa) που είναι δυνατό να κατασκευαστούν και (Γ) στην υπό συνθήκες έντονη εμφάνιση του πλέγματος των οπών στις προβολικές εικόνες. Τα προβλήματα αυτά θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.

A. Μέγιστο βάρος κατευθυντήρα

Το πρόβλημα του μεγίστου βάρους ενός κατευθυντήρα είναι απλό πρόβλημα το οποίο όμως παίζει σημαντικό ρόλο κυρίως στην κατασκευή κατευθυντήρων υψηλών ενεργειών (κυρίως στην ενέργεια των 511keV). Για τα 140keV ένας κλινικός εμπορικός κατευθυντήρας ζυγίζει 11-18 kg, ο οποίος μπορεί να τοποθετείται στο σύστημα γ-Κάμερα και χειρωνακτικά. Όμως για κατευθυντήρες μεσαίων ενεργειών, οι οποίοι ζυγίζουν περίπου 45kg, απαιτούνται ειδικές βάσεις για την τοποθέτηση ή την εξαγωγή του κατευθυντήρα από το σύστημα. Τέλος, λίγα συστήματα μπορούν να αντέξουν έναν κατευθυντήρα που να ζυγίζει πάνω από 180kg. Για τις ενέργειες των 511keV το βάρος του βέλτιστου κατευθυντήρα πολύ συχνά υπερβαίνει το όριο αντοχής του συστήματος. Ένα κάτω όριο στην μάζα ενός κατευθυντήρα μπορεί να υπολογιστεί από το εμπειρικό κριτήριο:

$$\rho\tau_{\text{hole shape}} \leq \frac{[\text{Mass of the collimator}]}{[\text{Area of the collimator face}]} \quad (1.19)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού του κατευθυντήρα [GUN04]. Για τα δύο πιο κοινά υλικά για κατευθυντήρες (μόλυβδος (Pb) και βολφράμιο (W)) ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Pb}}\tau_{\text{Hex}}(511\text{keV,Pb}) &= 78.4\text{g/cm}^2 \\ \rho_{\text{W}}\tau_{\text{Hex}}(511\text{keV,W}) &= 91.2\text{g/cm}^2 \end{aligned}$$

δηλαδή οι κατευθυντήρες από μόλυβδο ζυγίζουν λιγότερο από αυτούς από βολφράμιο και αυτός είναι ένας από τους λόγους που ο μόλυβδος προτιμάται από το βολφράμιο στη κατασκευή κατευθυντήρων. Για ένα σύστημα με οπτικό πεδίο διαστάσεων (50cm x 50cm) οι ελάχιστες μάζες των βέλτιστων κατευθυντήρων είναι (για ενέργεια 511keV) 196kg για μόλυβδο και 225kg για βολφράμιο. Ενώ για ενέργεια των 140keV είναι μόλις 12kg

χρησιμοποιώντας μόλυβδο. Τα περισσότερα συστήματα δεν αντέχουν το βάρος που απαιτείται για την ενέργεια των 511keV έτσι όλοι οι εμπορικοί κατευθυντήρες παραβιάζουν την ανισότητα (1.19). Εξαιτίας της απροθυμίας των εταιριών να φτιάξουν συστήματα που να αντέχουν το βάρος των 225kg πρέπει να βρεθεί μια άλλη λύση έτσι ώστε να μην παραβιάζεται η ανισότητα (1.19) αλλά να μην ξεπερνά το βάρος ενός κατευθυντήρα τα 135kg. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο ελαττώνοντας τις διαστάσεις του οπτικού πεδίου. Επειδή αυτές δεν είναι εφικτό να ελαττωθούν κατά την κατασκευή τους μόνο και μόνο για τον σωστή κατευθυντικότητα της ενέργειας των 511keV (είναι αρκετά σπάνιες οι εξετάσεις αυτές) αυτό που χρειάζεται είναι να χρησιμοποιηθεί το μισό μόνο από το συνολικό υπάρχον οπτικό πεδίο. Τότε ένας κατευθυντήρας θα ζύγιζε 90kg αντί για 180kg. Βέβαια στην περίπτωση αυτή πρέπει να θωρακιστεί το υπόλοιπο μισό οπτικό πεδίο από την ακτινοβολία των 511keV. Μπορεί να υπολογιστεί ότι αυτή η θωράκιση θα ζύγιζε μόλις 45kg και άρα η συνολική μάζα του κατευθυντήρα θα ήταν 135kg και έτσι το πρόβλημα της στήριξης έχει λυθεί. Η καθολική θωράκιση πάχους T' που απαιτείται είναι μικρότερη και ζυγίζει πάντοτε λιγότερο από ότι ένας κατευθυντήρας πάχους T για την ίδια ενέργεια γιατί στην πρώτη περίπτωση τα φωτόνια συναντούν καθ' όλη τη διαδρομή τους απορροφητικό υλικό ενώ στην δεύτερη περίπτωση συναντούν τμηματικά το απορροφητικό υλικό (στα διαφράγματα) σε συνδυασμό με αέρα (στις οπές).

B. Ελάχιστο πάχος των διαφραγμάτων

Το ελάχιστο πάχος των διαφραγμάτων είναι ο δεύτερος περιορισμός στην κατασκευή των βέλτιστων κατευθυντήρων. Οι κατευθυντήρες κατασκευάζονται είτε με την τεχνική του καλουπιού είτε με την τεχνική αναδίπλωσης ελασμάτων μολύβδου. Χρησιμοποιώντας καλούπι απαιτούνται διαφράγματα πιο παχιά από 0.3mm-0.5mm (εξαρτάται από τη διαδικασία κατασκευής και την εταιρία κατασκευής) ενώ αναδιπλώνοντας ελάσματα μολύβδου μπορούν να κατασκευαστούν πιο λεπτά διαφράγματα περίπου στα 0.15mm. Κατά την τεχνική του καλουπιού εμφανίζεται το πρόβλημα της σωστής απομάκρυνσης του κατευθυντήρα από αυτό χωρίς να καταστραφούν τα διαφράγματα του. Όσο πιο λεπτά είναι τόσο πιο εύκολα καταστρέφονται. Όμως η ποιότητα των κατευθυντήρων με την τεχνική αυτή είναι καλύτερη από αυτή της αναδίπλωσης ελασμάτων μολύβδου με την οποία γίνονται πιο εύκολα κατασκευαστικά λάθη τα οποία οδηγούν στην εμφάνιση artifacts στην προβολική εικόνα. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές κατευθυντήρων συνήθως προτιμούν την τεχνική της αναδίπλωσης με την οποία είναι δυνατόν να κατασκευαστούν λεπτότερα διαφράγματα αν και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την κατασκευή τους. Δυστυχώς για χαμηλές ενέργειες ($E < 140\text{keV}$) οι βέλτιστοι κατευθυντήρες απαιτούν διαφράγματα λεπτότερα από αυτά που μπορούν να κατασκευαστούν και από τις δύο διαδικασίες και συνεπώς η βέλτιστη λύση δεν

είναι εφικτή. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο κατασκευαστής κατασκευάζει τα λεπτότερα διαφράγματα που μπορεί.

Γ. Έντονη εμφάνιση του πλέγματος των οπών

Η εμφάνιση του πλέγματος των οπών είναι ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα στην κατασκευή των κατευθυντήρων. Στην ιδανική λειτουργία ενός συστήματος γ-Κάμερα το πλέγμα των οπών του κατευθυντήρα θα ήταν πάντα ορατό στην προβολική εικόνα. Όμως εξαιτίας της περιορισμένης διακριτικής ικανότητας του συστήματος το πλέγμα είναι πολύ σπάνια ορατό και δεν επηρεάζει την ποιότητα των προβολικών εικόνων. Όμως, υπό συγκεκριμένες συνθήκες το πλέγμα των οπών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις εικόνες και να οδηγήσει σε εσφαλμένα διαγνωστικά αποτελέσματα. Οπότε, η προστασία από τα artifacts που προκαλεί η εμφάνιση του πλέγματος των οπών είναι σημαντική υπόθεση.

Χρησιμοποιώντας ενέργεια των 140keV πολύ σπάνια εμφανίζεται το πλέγμα των οπών στις εικόνες. Αυτό συμβαίνει γιατί η τυπική διακριτική ικανότητα του συστήματος στις ενέργειες αυτές ($FWHM_{cam}=3-4mm$) είναι μεγάλη για την απεικόνιση των διαφραγμάτων στις προβολικές εικόνες. Μπορεί να αποδειχθεί ότι το πλέγμα των οπών εμφανίζεται στην εικόνα όταν:

$$HOLSEP < \frac{FWHM_{cam} FWHM_{obj}}{\sqrt{FWHM_{cam}^2 + FWHM_{obj}^2}} \quad (1.20)$$

όπου $FWHM_{obj}$ είναι το μέγεθος του αντικειμένου που προβάλλεται. Αυτή η ανισότητα λέγεται το κριτήριο του πλέγματος των οπών. Στην ανισότητα αυτή παρατηρούμε ότι δεν περιλαμβάνεται το σχήμα ή η διάταξη των οπών, παρά μόνο το HOLSEP. Σε μια τυπική εξέταση το μέγεθος των αντικειμένων προς απεικόνιση είναι πολύ μεγαλύτερο από την διακριτική ικανότητα του συστήματος ($FWHM_{cam} \ll FWHM_{obj}$), έτσι η σχέση (1.20) μετασχηματίζεται στην σχέση (1.21):

$$HOLSEP < FWHM_{cam} \quad (1.21)$$

Σχεδόν πάντα στα εμπορικά συστήματα γ-Κάμερα η σχέση (1.21) ισχύει και για το λόγο αυτό το πλέγμα των οπών δεν εμφανίζεται στις προβολικές εικόνες. Όμως το κριτήριο αυτό αποτυγχάνει αν το αντικείμενο, σε οποιαδήποτε διάσταση του, είναι μικρότερο από την απόσταση HOLSEP. Αυτό συμβαίνει στην απεικόνιση λεπτών τριχοειδών σωληνοειδών γεμισμένα με υδατικό διάλυμα ^{99m}Tc . Στις εικόνες αυτές, εμπορικών συστημάτων γ-Κάμερα) εμφανίζονται artifacts που οφείλονται στο πλέγμα των οπών του κατευθυντήρα. Επίσης κατά την χρήση φωτονίων υψηλής ενέργειας μπορεί να εμφανιστεί το πρόβλημα αυτό της εμφάνισης του πλέγματος των οπών στις προβολικές εικόνες.

Η πιο κοινή μέθοδος αντιμετώπισης των artifacts αυτών μπορεί να εφαρμοστεί στις ανακατασκευασμένες εικόνες SPECT και όχι στις προβολικές. Αυτό γίνεται εισάγοντας στον

αλγόριθμο ανακατασκευής κατάλληλες συναρτήσεις που να περιγράφουν και έτσι να απαλείφουν τη διάταξη του πλέγματος (το οποίο είναι περιοδικό) του κατευθυντήρα. Μια άλλη μέθοδος είναι μετακινώντας τον κατευθυντήρα κατά τη διάρκεια της εξέτασης. Με τον τρόπο αυτό η διάταξη του πλέγματος μεταβάλλεται με τον χρόνο και έτσι απαλείφεται από την προβολική εικόνα. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ‘collywobbling’ και εφαρμόζεται εδώ και αρκετά χρόνια σε πειραματικό στάδιο είτε μετακινώντας τον κατευθυντήρα είτε περιστρέφοντας τον. Και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι επιτυχή δηλαδή δεν εμφανίζεται το πλέγμα των οπών στις προβολικές εικόνες. Παρά την επιτυχία της, η μέθοδος δεν εφαρμόζεται στο κλινικό περιβάλλον γιατί αυξάνει πάρα πολύ το κόστος του κατευθυντήρα και το εύρος χρήσης της είναι περιορισμένο.

Ένα έξυπνο τρικ για την αντιμετώπιση των artifacts είναι η τεχνική της παρασκιάς. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή αυξάνοντας την απόσταση B μεταξύ του κατευθυντήρα και του ανιχνευτή δημιουργείται παρασκιά από την ακτινοβολία γειτονικών οπών η οποία ελαττώνει σε πολύ μεγάλο βαθμό την εμφάνιση του πλέγματος των οπών στην προβολική εικόνα. Μπορεί να αποδειχθεί (αλλά είναι πέρα από τον σκοπό του κεφαλαίου αυτού) ότι όσο το B αυξάνει τότε το πλέγμα των οπών απεικονίζεται ολοένα και λιγότερο. Αυτό συμβαίνει μέχρι μια κρίσιμη τιμή του B και από την τιμή αυτή και πάνω το πλέγμα απεικονίζεται ξανά όλο και περισσότερο. Η κρίσιμη αυτή τιμή του B είναι και η βέλτιστη B_{opt} και εξαρτάται από το σχήμα της οπής και την δομή του πλέγματος των οπών του κατευθυντήρα. Για τετραγωνικές οπές (απλούστερη περίπτωση) αποδεικνύεται ότι:

$$B_{opt} = T \frac{(2HOLSEP - \sqrt{\pi D})}{\sqrt{\pi D}} \quad (1.22)$$

Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να εξαχθούν και για διαφορετικά σχήματα οπών.

1.5 Μελέτη ιδιοτήτων κατευθυντήρων με προσομοιώσεις

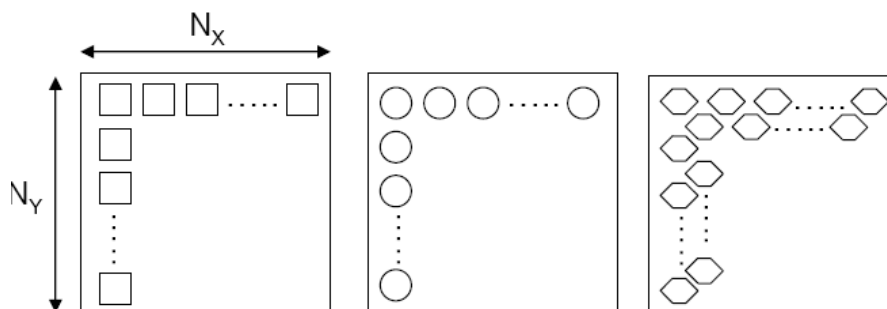
Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως (σχέση 1.12) για τους κατευθυντήρες παραλλήλων οπών ισχύει ο λόγος:

$$\frac{D}{T} = \frac{R}{F + T + B} \quad (1.23)$$

όπου D η διάμετρος της οπής, T το πάχος του κατευθυντήρα, F η απόσταση κατευθυντήρα-πηγής, B η απόσταση κατευθυντήρα-ανιχνευτή και R η διακριτική του ικανότητα. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι η ευαισθησία του δίνεται από τη σχέση:

$$\langle \$ \rangle = C_{hole\ shape} \frac{\pi D^4}{64T^2 [HOLSEP]^2}$$

Στην παράγραφο αυτή μελετούνται με τη βοήθεια προσομοιώσεων βασισμένων στο λογισμικό πακέτο Geant4/GATE [JAN04] οι ιδιότητες 3 βασικών σχημάτων οπών του κατευθυντήρα: τετραγωνικές, κυκλικές και εξαγωνικές (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Βασικά είδη σχημάτων οπών κατευθυντήρων παραλλήλων οπών (αριστερά: τετραγωνικές, κέντρο: κυκλικές, δεξιά: εξαγωνικές) που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Για καθένα από τα 3 σχήματα οπών υπολογίστηκε η γεωμετρική ευαισθησία (εμβαδόν όλων των οπών προς το συνολικό εμβαδόν του κατευθυντήρα) των αντίστοιχων τύπων κατευθυντήρων.

Στην περίπτωση των τετραγωνικών οπών (πλευράς τετραγώνου \$S\$) η γεωμετρική ευαισθησία είναι ίση με:

$$\begin{aligned} \$_{GEOM}^{sq} &= \frac{N^2 \cdot S^2}{((N-1) \cdot HOLSEP + S)^2} = \frac{N^2 \cdot S^2}{(N-1)^2 \cdot HOLSEP^2 + S^2 + 2 \cdot S \cdot (N-1) \cdot HOLSEP} = \\ &= \frac{1}{\left(\frac{N-1}{N}\right)^2 \cdot \frac{HOLSEP^2}{S^2} + \frac{1}{N^2} + 2 \cdot \frac{(N-1) \cdot S}{N^2 \cdot S^2} \cdot HOLSEP} \\ &\text{και για } N \rightarrow \infty \text{ είναι } \$_{GEOM}^{sq} = \frac{1}{\left(\frac{HOLSEP}{S}\right)^2} \end{aligned} \quad (1.24)$$

Στην περίπτωση των κυκλικών οπών (διαμέτρου \$D\$) η γεωμετρική ευαισθησία είναι ίση με:

$$\begin{aligned} \$_{GEOM}^{cir} &= \frac{N^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{((N-1) \cdot HOLSEP + D)^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{N^2 \cdot S^2}{(N-1)^2 \cdot HOLSEP^2 + D^2 + 2 \cdot (N-1) \cdot D \cdot HOLSEP} = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{\left(\frac{N-1}{N}\right)^2 \cdot \frac{HOLSEP^2}{D^2} + \frac{1}{N^2} + 2 \cdot \frac{(N-1) \cdot D}{N^2 \cdot D^2} \cdot HOLSEP} \end{aligned}$$

$$\text{και για } N \rightarrow \infty \text{ είναι } \$_{GEOM}^{cir} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{\left(\frac{HOLSEP}{D}\right)^2} \quad (1.25)$$

Στην περίπτωση των εξαγωνικών οπών ο υπολογισμός της γεωμετρικής ευαισθησίας δεν είναι τόσο απλός. Αν R η ακτίνα του περιγεγραμμένου κύκλου της εξαγωνικής οπής και h η ακτίνα του αντίστοιχου εγγεγραμμένου της κύκλου τότε ισχύουν οι σχέσεις:

$$R = S$$

$$h = \frac{\sqrt{3}S}{2}$$

Οι αποστάσεις Δx και Δy μεταξύ 2 διαδοχικών εξαγώνων στον x και y άξονα αντίστοιχα είναι ίσες με:

$$\Delta x = 3R + SPT = 3S + SPT$$

$$\Delta y = 2h + SPT = \sqrt{3}S + SPT$$

και ο συνολικός αριθμός N_x και N_y των οπών στις διαστάσεις x και y αντίστοιχα:

$$N_x = \frac{2x}{(3R + SPT)} = \frac{2x}{(3S + SPT)}$$

$$N_y = \frac{y}{(2h + SPT)} = \frac{y}{(\sqrt{3}S + SPT)}$$

(ο συντελεστής 2 στο N_x προκύπτει γιατί υπάρχουν 2 σειρές εξαγώνων που συμπληρώνουν η μια την άλλη και όχι 1 σειρά όπως στην περίπτωση των τετραγωνικών και κυκλικών οπών).

Το εμβαδόν κάθε εξαγώνου είναι:

$$E_{hex} = 6 \cdot \frac{1}{2} \cdot h \cdot R = 3 \cdot h \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot h = \frac{6}{\sqrt{3}} \cdot h^2 = 2\sqrt{3} \cdot h^2 = \frac{3\sqrt{3}S^2}{2}$$

Έτσι η γεωμετρική ευαισθησία στην περίπτωση των εξαγωνικών οπών είναι ίση με:

$$\$_{GEOM}^{hex} = \frac{N_x \cdot N_y \cdot E_{hex}}{E_{tot}} = \frac{2a}{(3R + SPT)} \cdot \frac{a}{(\sqrt{3}R + SPT)} \cdot 2\sqrt{3} \cdot h \frac{1}{a^2} = \frac{3\sqrt{3} \cdot S^2}{(3S + SPT) \cdot (\sqrt{3}S + SPT)} \quad (1.26)$$

Στην ακραία περίπτωση που SPT=0 τότε η (1.38) γίνεται:

$$\$_{GEOM}^{hex} = \frac{4 \cdot h^2}{3 \cdot R^2} = \frac{R^2}{R^2} = 1$$

που σημαίνει, όπως αναμένεται, ότι ο κατευθυντήρας είναι πλήρως διαπερατός.

Αφού υπολογίστηκε η γεωμετρική ευαισθησία των βασικών κατευθυντήρων, ακολούθησε υπολογισμός της ευαισθησίας ενός κατευθυντήρα εξαγωνικών οπών χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοίωσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών Geant4/GATE του CERN. Ο κατευθυντήρας που περιγράφηκε έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

$$R + SPT / 2 = 0.60mm$$

$$HOLSEP = 2 \cdot (h + SPT / 2) = \sqrt{3} \cdot (R + SPT / 2) = 1.04mm$$

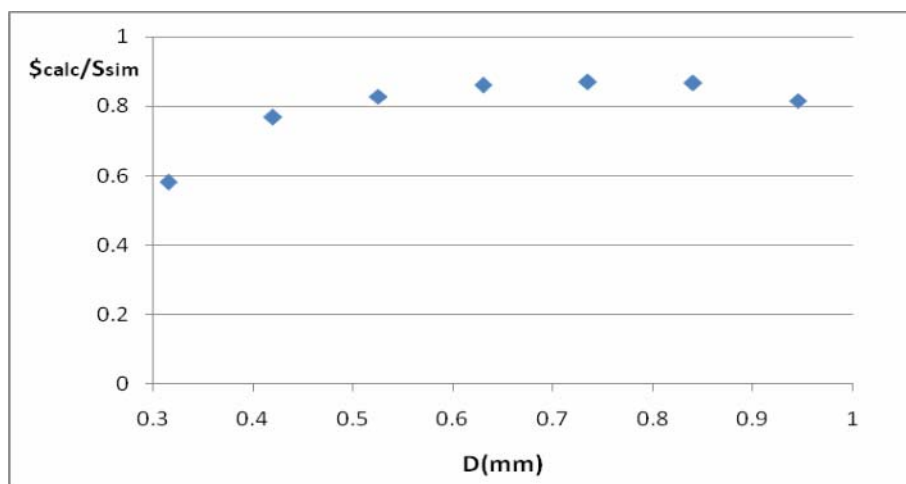
$$T = 20mm$$

Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκε ραδιενεργή πηγή ^{99m}Tc σε μεγάλη απόσταση από τον κατευθυντήρα με ενεργότητα $A=10^5\text{Bq}$ για χρόνο ακτινοβολήσης $t=10^4\text{s}$. Οπότε παρήχθησαν συνολικά $N_i=10^9$ σωματίδια. Αφού καταγράφηκαν τα σωματίδια που διαπέρασαν τον κατευθυντήρα N_k και ο λόγος N_k / N_i δίνει την ευαισθησία του κατευθυντήρα. Το πρόγραμμα εκτελέστηκε για διαφορετικές τιμές της διαμέτρου D (όπως δίνεται από τη σχέση 1.1) διατηρώντας την απόσταση $HOLSEP=1.04mm$ σταθερή. Συνοπτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 1.2 στον οποίο έχει υπολογιστεί τόσο η θεωρητική ευαισθησία του κατευθυντήρα που δίνεται από την σχέση 1.9 και η διαφορά της από την τιμή που προκύπτει από την προσομοίωση [MIK09].

h(mm)	D(mm)	SPT(mm)	$S_{\text{calc}}(\cdot 10^{-6})$	N_k	$S_{\text{sim}}(\cdot 10^{-6})$	$S_{\text{calc}}/S_{\text{sim}}$
0.15	0.315	0.725	1.29	2222	2.22	0.581
0.20	0.420	0.620	4.077	5309	5.31	0.768
0.25	0.525	0.515	9.953	12024	12.02	0.828
0.30	0.630	0.410	20.64	23987	24.00	0.860
0.35	0.735	0.305	38.24	43961	43.96	0.870
0.40	0.840	0.200	65.23	75349	75.35	0.866
0.45	0.945	0.095	104.48	128097	128.1	0.816

Πίνακας 1.2: Αποτελέσματα ευαισθησίας κατευθυντήρα παραλλήλων εξαγωνικών οπών βασισμένα στη θεωρία και σε προσομοιώσεις με το λογισμικό GATE.

Από τα δεδομένα του Πίνακα 1.2 παρατηρείται ότι η ευαισθησία που προκύπτει από την προσομοίωση είναι πάντα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη θεωρητική της τιμή. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι κατά την προσομοίωση καταμετρούνται και φωτόνια που λόγω σκεδάσεων τους ή διαπερατότητας τους από τα διαφράγματα του κατευθυντήρα έχουν ανιχνευτεί ενώ με τον θεωρητικό τύπο δεν λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα αυτά. Ο λόγος τους είναι σχεδόν σταθερός για ενδιάμεσες τιμές της διαμέτρου D ενώ διαφέρει περισσότερο για ακραίες (πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές) τιμές του D . Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται η εξάρτηση αυτή για τις διάφορες τιμές της διαμέτρου D .

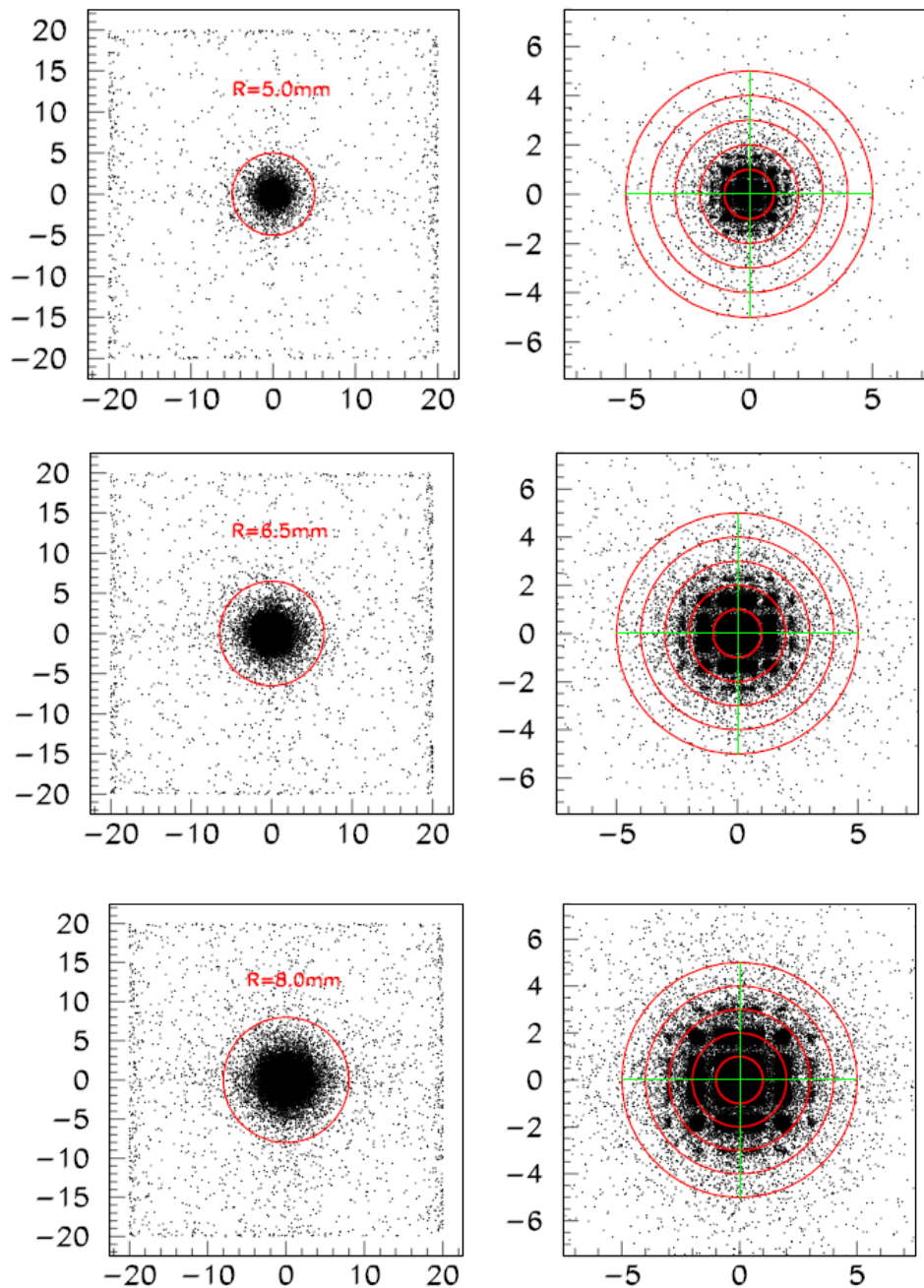


Σχήμα 1.6: Εξάρτηση του λόγου S_{sim}/S_{calc} για τις διάφορες τιμές της διαμέτρου των οπών D.

Σε παρόμοια προσομοίωση με κατευθυντήρα κυκλικών οπών, παρατηρούνται τα αποτελέσματα του Σχήματος 1.7. Σε κάθε περίπτωση η εστιακή απόσταση F και το πάχος T του κατευθυντήρα παραμένουν σταθερά και ίσα με $F=50\text{mm}$ και $T=20\text{mm}$ ενώ μεταβάλλεται η διάμετρος των οπών D και το πάχος SPT των διαφραγμάτων και παίρνουν τις τιμές (D, SPT) = (0.40mm, 0.10mm), (0.60mm, 0.15mm) και (0.80mm, 0.20mm). Στο σχήμα αυτό απεικονίζονται οι δισδιάστατες προβολικές εικόνες για τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνουν τα D και SPT τόσο χειρότερη είναι η διακριτική ικανότητα (αναμενόμενο αυτό) γιατί τόσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα του κύκλου με τον οποίο απεικονίζεται η σημειακή πηγή. Ο απεικονιζόμενος κύκλος αντιστοιχεί στο FWTM της παρατηρούμενης προβολής στον έναν από τους δύο άξονες. Επίσης οι οπές του κατευθυντήρα διακρίνονται περισσότερο λόγω της αύξησης του πάχους SPT των διαφραγμάτων.

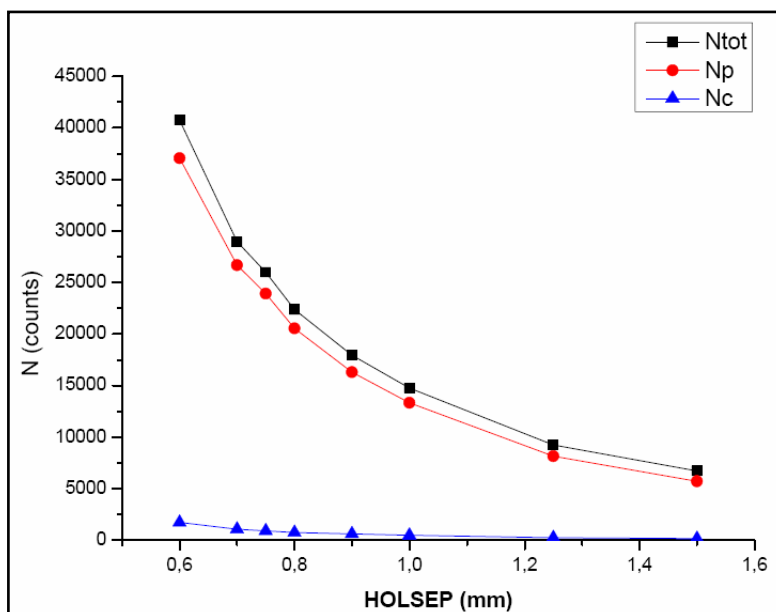
Στις επόμενες προσομοιώσεις μελετήθηκε το ποσοστό της ακτινοβολίας που προέρχεται από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και από σκέδαση Compton στον κατευθυντήρα. Για να εκτιμηθεί το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιήθηκε κατευθυντήρας παραλλήλων τετραγωνικών οπών διαστάσεων $(x,y,z) = (40.5\text{mm}, 40.5\text{mm}, 20.0\text{mm})$. Η πηγή ^{99m}Tc τοποθετήθηκε σε απόσταση $F=10.0\text{cm}$ από τον κατευθυντήρα και συνολικά εκπέμφθηκαν $N_{tot}=10^8$ φωτόνια. Η πλευρά των οπών S παραμένει σταθερή και ίση με $D=0.50\text{mm}$ ενώ μεταβάλλεται το πάχος των διαφραγμάτων SPT (ισχύει $HOLSEP=S+SPT$).



Σχήμα 1.7: Προβολικές εικόνες κατευθυντήρων παραλλήλων κυκλικών οπών, όπως προκύπτουν από την προσομοίωση, για τιμές (D, SPT) α) $(0.40, 0.10)$ – πάνω εικόνες, β) $(0.60, 0.15)$ – κεντρικές εικόνες και γ) $(0.80, 0.20)$ – κάτω εικόνες. Οι εικόνες δεξιά προκύπτουν από μεγέθυνση των αντίστοιχων εικόνων αριστερά. Όλες οι αποστάσεις μετριοούνται σε mm. Η διάμετρος του απεικονιζόμενου κύκλου σε κάθε περίπτωση αντιστοιχεί στο FWTM. Οι ομόκεντροι κύκλοι εδώ είναι βοηθητικοί.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 1.8 φαίνεται ο αριθμός των συνολικών φωτονίων N_{tot} , των φωτονίων από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο N_p και των φωτονίων σκέδασης Compton N_c . Παρατηρείται ότι η ο αριθμός των ολικών φωτονίων (εκφράζουν την ευαισθησία του κατευθυντήρα) μειώνεται, όπως αναμένεται και θεωρητικά, όσο αυξάνεται το πάχος των διαφραγμάτων SPT και ότι η συντριπτική πλειοψηφία των φωτονίων που ανιχνεύονται είναι

από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και όχι με σκέδαση Compton καθώς το ποσοστό τους είναι πολύ χαμηλό.

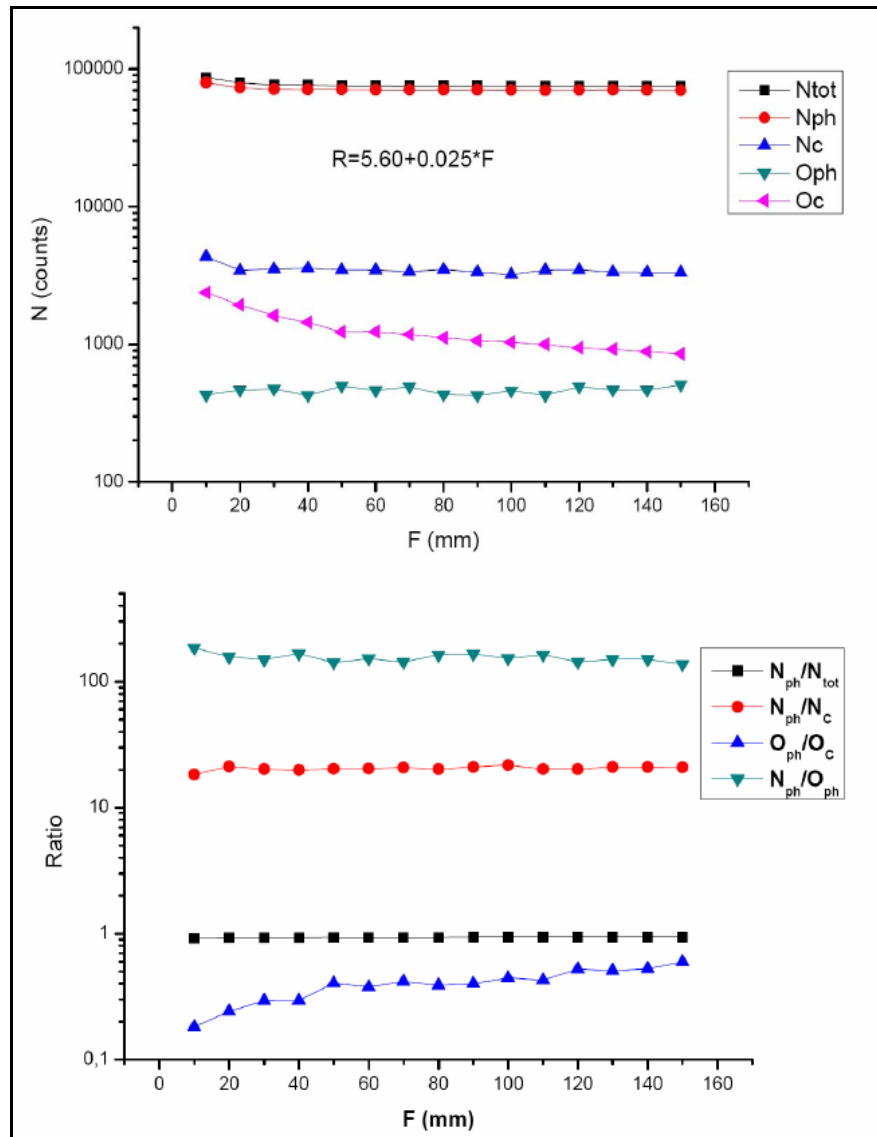


Σχήμα 1.8: Αριθμός ανιχνευόμενων φωτονίων από κατευθυντήρα τετραγωνικών οπών, πλευράς $D=0.50\text{mm}$ από συνολικό αριθμό 10^8 εκπεμπόμενων φωτονίων από την πηγή. Με μαύρο χρώμα είναι ο συνολικός αριθμός των ανιχνευόμενων φωτονίων, με κόκκινο αυτά που προέρχονται από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και με μπλε από φαινόμενο Compton στον κατευθυντήρα.

Για τη μελέτη της εξάρτησης του ποσοστού των φωτονίων είτε από φωτοηλεκτρικό είτε από σκέδαση Compton στον κατευθυντήρα σε σχέση με τη μεταβολή της απόστασης F της πηγής χρησιμοποιήθηκε κατευθυντήρας εξαγωνικών οπών με χαρακτηριστικά $(h, \text{SPT}, T) = (0.40\text{mm}, 0.24\text{mm}, 20.0\text{mm})$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 1.9 στις οποίες N_{tot} ο αριθμός των συνολικών φωτονίων, N_{ph} ο αριθμός των φωτονίων από φωτοηλεκτρικό τα οποία περιέχονται μέσα σε κύκλο (FWTM) στον οποίο προβάλλεται η σημειακή πηγή (εξαρτάται από την απόσταση F πηγής κατευθυντήρα), N_c ο αριθμός φωτονίων εντός του κύκλου που προέρχονται από φαινόμενο Compton. Τα αντίστοιχα μεγέθη για ανιχνευόμενα φωτόνια εκτός της κυκλικής περιοχής αυτής χαρακτηρίζονται με το γράμμα O . O_{ph} είναι ο αριθμός των φωτονίων από φωτοηλεκτρικό σε περιοχές εκτός του κύκλου και O_c ο αριθμός των φωτονίων από φαινόμενο Compton σε περιοχές εκτός του κύκλου.

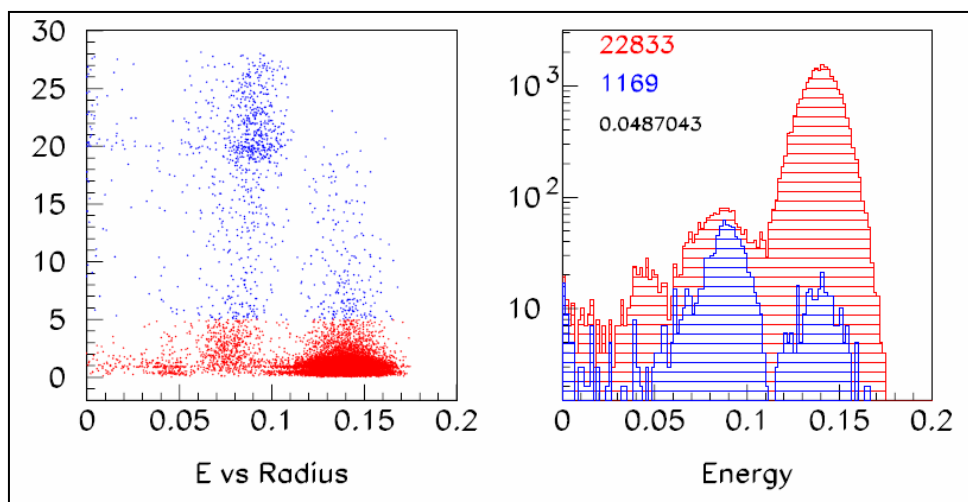
Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι όπως αναμένεται και θεωρητικά ο αριθμός των φωτονίων δεν εξαρτάται από την απόσταση F πηγής-κατευθυντήρα. Ακόμα η μεγάλη πλειοψηφία είναι φωτόνια φωτοηλεκτρικού εντός του κύκλου. Μελετώντας τους λόγους τους φαίνεται ότι εντός του κύκλου τα φωτόνια φωτοηλεκτρικού είναι περίπου 1 τάξη μεγέθους περισσότερα από τα αντίστοιχα του φαινομένου Compton ενώ στις περιοχές εκτός του κύκλου ο λόγος αυτός αντιστρέφεται και τα φωτόνια Compton γίνονται περίπου 2 φορές περισσότερα από τα αντίστοιχα φωτοηλεκτρικού. Όλοι οι προηγούμενοι λόγοι δεν

μεταβάλλονται από την απόσταση F. Ελαφρά άνοδο με το F παρουσιάζει μόνο ο λόγος O_{ph}/O_c , ο οποίος όπως αναφέρθηκε διαδραματίζει λόγω απολύτου μεγέθους πολύ μικρό ρόλο.

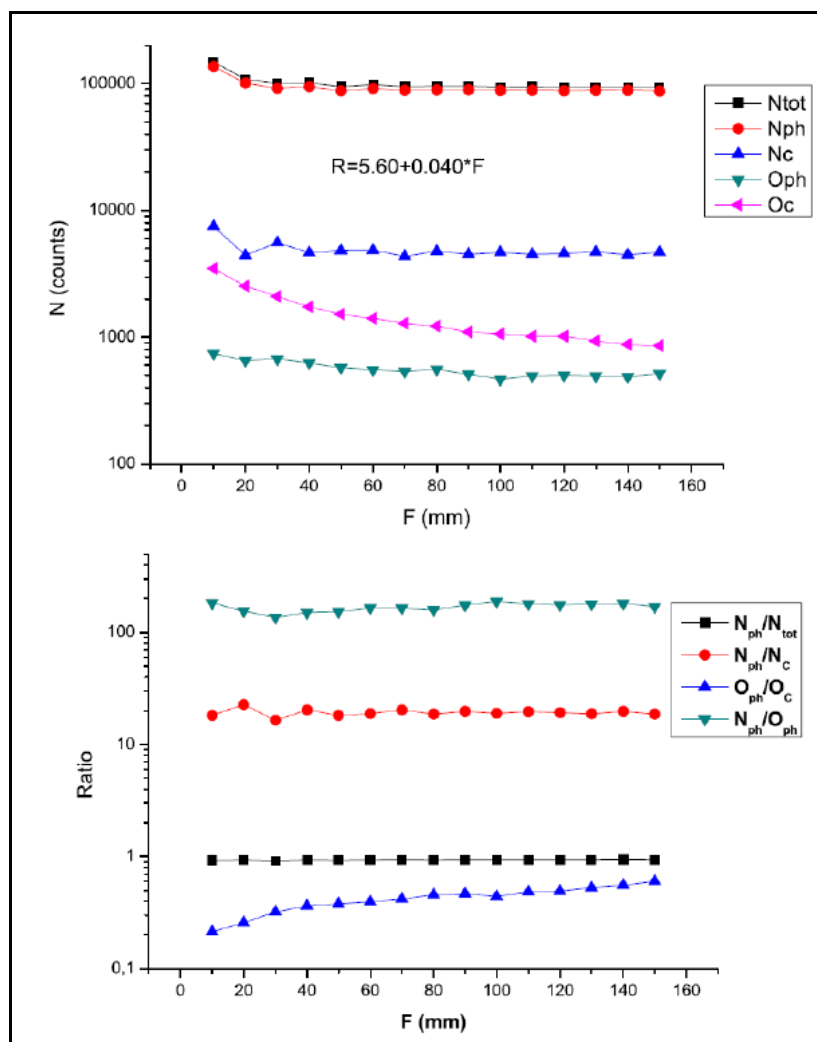


Σχήμα 1.9: Άνω τμήμα: Γραφική παράσταση (για διάφορες τιμές της απόστασης πηγής-κατευθυντήρα F και περίπτωση εξαγωνικών οπών), του αριθμού των συνολικών φωτονίων που καταγράφηκαν στη προσομοίωση N_{tot} , του αριθμού που βρίσκονται μέσα σε κύκλο ακτίνας R και προέρχονται είτε από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο N_{ph} είτε από φαινόμενο Compton N_c και του αριθμού που βρίσκονται εκτός του κύκλου και προέρχονται είτε από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο O_{ph} είτε από φαινόμενο Compton O_c . **Κάτω τμήμα:** Απεικονίζονται οι αντίστοιχοι λόγοι τους.

Στο Σχήμα 1.10 φαίνεται το φάσμα ενέργεια που προκύπτει από την προσομοίωση, το ολικό και το σχετικό με την απόσταση R από το κέντρο κάθε οπής. Παρατηρώντας το φάσμα επιβεβαιώνονται τα προηγούμενα αποτελέσματα. Δηλαδή, στην περιοχή ενεργειών της φωτοκορυφής τα περισσότερα φωτόνια βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις R, ενώ σε περιοχές χαμηλότερων ενεργειών παρατηρούνται περισσότερα φωτόνια σε μεγάλες τιμές της απόστασης R από ότι σε μικρές τιμές.



Σχήμα 1.10: Γραφική παράσταση του φάσματος της ενέργειας. Αριστερά είναι το σχετικό με την απόσταση R από το κέντρο κάθε οπής και δεξιά το συνολικό.

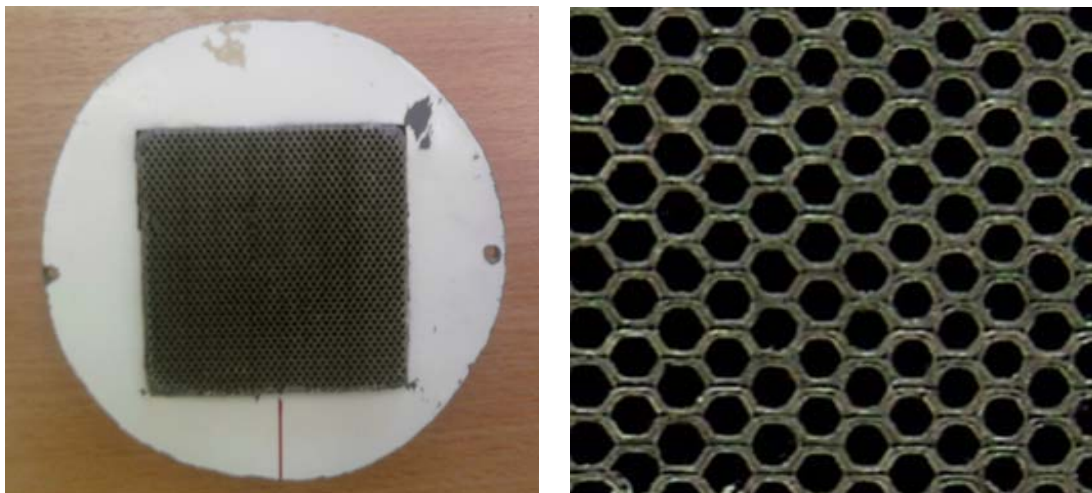


Σχήμα 1.11: Άνω τμήμα: Γραφική παράσταση (για διάφορες τιμές της απόστασης πηγής-κατευθυντήρα F και περίπτωση τετραγωνικών οπών), του αριθμού των συνολικών φωτονίων που καταγράφηκαν στη προσομοίωση N_{tot} , του αριθμού που βρίσκονται μέσα σε κύκλο ακτίνας R και προέρχονται είτε από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο N_{ph} είτε από φαινόμενο Compton N_c και του αριθμού που βρίσκονται εκτός του κύκλου και προέρχονται είτε από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο O_{ph} είτε από φαινόμενο Compton O_c . **Κάτω τμήμα:** Απεικονίζονται οι αντίστοιχοι λόγοι τους.

Στη συνέχεια επαναλήφθηκαν οι προσομοιώσεις για κατευθυντήρα παραλλήλων τετραγωνικών οπών με χαρακτηριστικά $(h, SPT, T) = (0.40\text{mm}, 0.20\text{mm}, 20.0\text{mm})$ και τα αποτελέσματα φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 1.11. Παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα με την περίπτωση των εξαγωνικών οπών, συνεπώς δεν εξαρτώνται από το σχήμα της οπής.

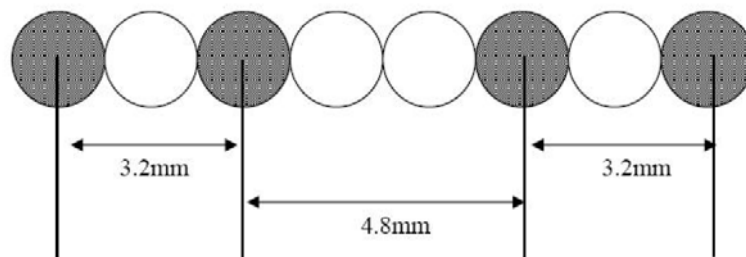
1.6 Κατευθυντήρας του συστήματος

Ο κατευθυντήρας μολύβδου (Σχήμα 1.12) που χρησιμοποιείται είναι εξαγωνικών οπών σε εξαγωνικό πλέγμα (Σχήμα 1.12). Έχει διαστάσεις $(x, y) = (59.0\text{mm}, 60.0\text{mm})$ με αντίστοιχο αριθμό οπών (32, 23) σε κάθε διάσταση αντίστοιχα. Ακολουθώντας την ορολογία του Σχήματος 1.2 ο κατευθυντήρας του συστήματος χαρακτηρίζεται από $F2F=1.30\text{mm}$, $HOLSEP=1.55\text{mm}$, $s=0.75\text{mm}$, $SPT=0.25\text{mm}$, $D=1.364\text{mm}$ και πάχους $T=26.8\text{mm}$. Από τα χαρακτηριστικά του και μετά από απλές πράξεις υπολογίζουμε ότι η ευαισθησία του είναι ίση με $\$=1.14 \cdot 10^{-4}$ και η διακριτική ικανότητα του για αποστάσεις $F=10\text{mm}$ από τον κατευθυντήρα είναι ίση με $FWHM_{col}=2.16\text{mm}$ (θεωρώντας $C_{hole\ shape}=1.155$).



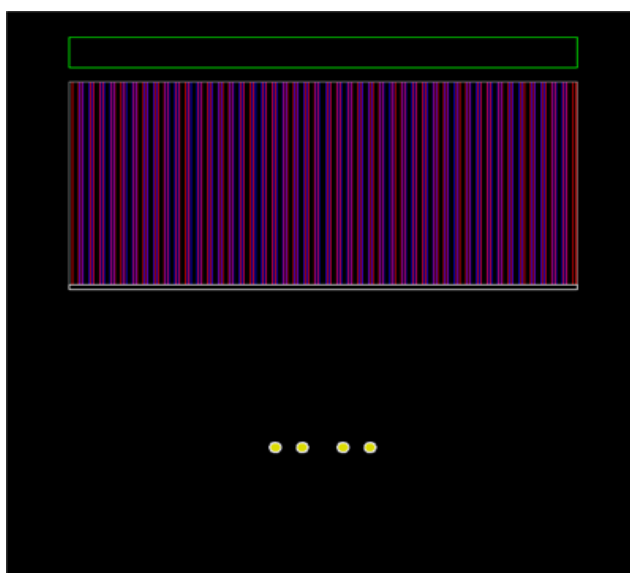
Σχήμα 1.12: Αριστερά: Ο κατευθυντήρας εξαγωνικών οπών του συστήματος της γ-Κάμερα. Δεξιά: Οι οπές του κατευθυντήρα σε μεγέθυνση.

Προσπαθώντας να μελετήσουμε τη διακριτική ικανότητα του κατευθυντήρα του εργαστηρίου έγιναν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας πάλι το πρόγραμμα προσομοίωσης GATE, και πειράματα με ομοίωμα τεσσάρων τριχοειδών σωλήνων (εσωτερικής διαμέτρου $D_{in}=1.1\text{mm}$ και εξωτερικής $D_{out}=1.6\text{mm}$) γεμισμένα με υδατικό διάλυμα ^{99m}Tc (Σχήμα 1.13). Το ομοίωμα τοποθετείται σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του κατευθυντήρα και λαμβάνονται οι αντίστοιχες προβολικές εικόνες οι οποίες συγκρίνονται και μεταξύ τους [MIK07].



Σχήμα 1.13: Το ομοίωμα των τεσσάρων τριχοειδών σωληνοειδών γεμισμένα με υδατικό διάλυμα ^{99m}Tc . Με γκρι είναι τα σωληνοειδή που περιέχουν ^{99m}Tc ενώ τα άσπρα χρησιμοποιούνται ως διαχωριστές.

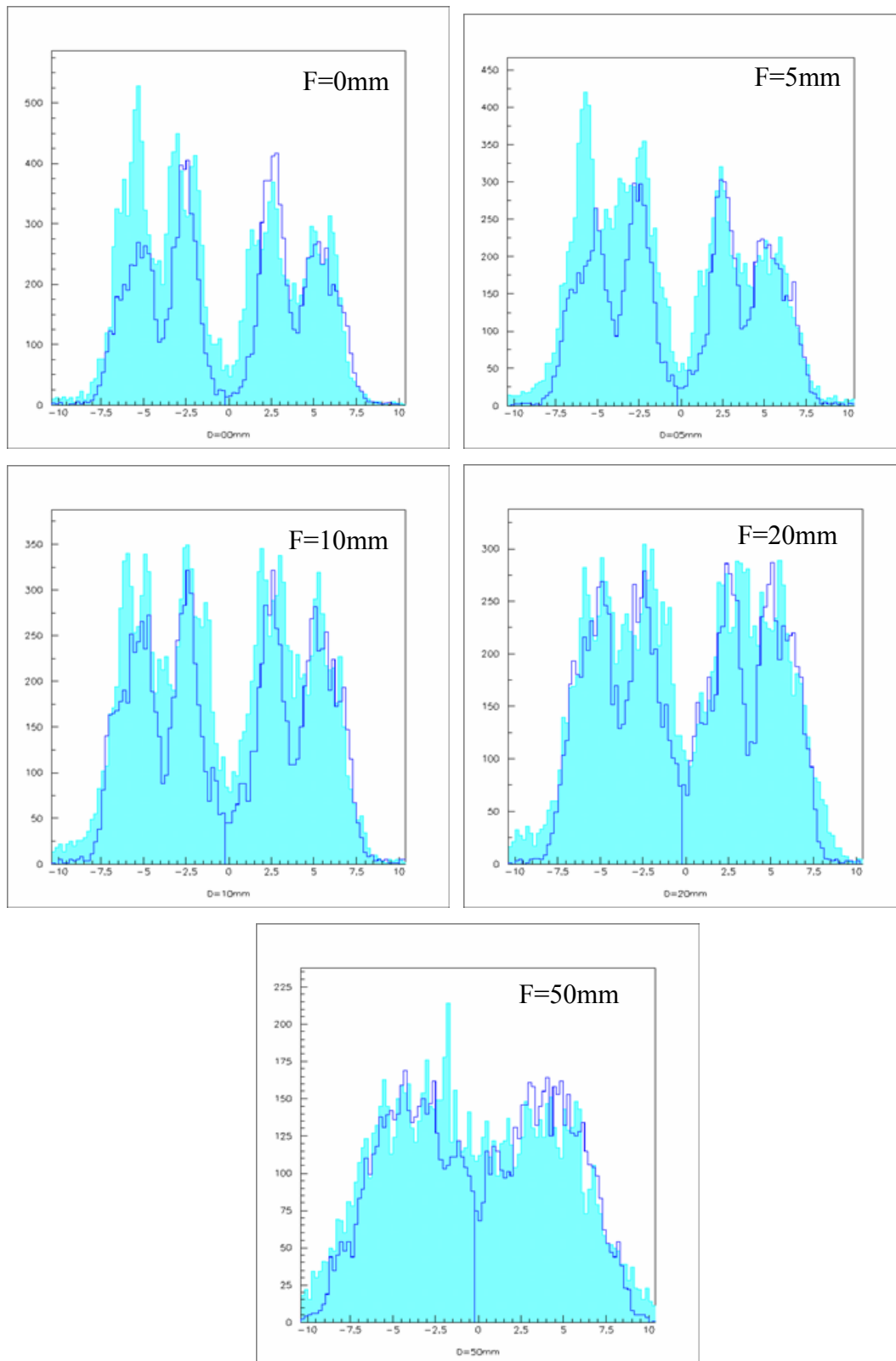
Στο Σχήμα 1.14 φαίνεται η διάταξη όπως περιγράφηκε στο πρόγραμμα GATE και διακρίνονται τα τέσσερα τριχοειδή, ο κατευθυντήρας και ο σπινθηριστής κρύσταλλος CsI(Tl).



Σχήμα 1.14: Η διάταξη της προσομοίωσης όπως περιγράφηκε στο πρόγραμμα GATE.

Προσομοιώσεις και πειράματα έγιναν για 5 διαφορετικές αποστάσεις ομοιώματος-κατευθυντήρα (0mm, 5mm, 10mm, 20mm και 50mm) και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα διαγράμματα του Σχήματος 1.15. Παρατηρούμε ότι για τις μικρές αποστάσεις των 0mm και 5mm τα σωληνοειδή (που βρίσκονται σε απόσταση 1.5mm μεταξύ τους) διακρίνονται καθαρά όπως και αναμένουμε, ενώ στις μεσαίες αποστάσεις των 10mm και 20mm διακρίνονται αλλά χωρίς καλή ευκρίνεια (δηλαδή διακριτική ικανότητα) ενώ στη μεγαλύτερη απόσταση των 50mm τα αντίστοιχα σωληνοειδή δεν διαχωρίζονται μεταξύ τους. Ένα επιπλέον συμπέρασμα είναι ότι τα αποτελέσματα προσομοίωσης και πειράματος ταυτίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια γεγονός που την καθιστά σημαντικό εργαλείο στην εκτέλεση εικονικών πειραμάτων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί η προσομοίωση να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών ενός πειράματος πριν εκτελεστεί αυτό στο

εργαστήριο και για την εκτέλεση πειραμάτων που δεν είναι εφικτό να εκτελεστούν στο εργαστήριο.

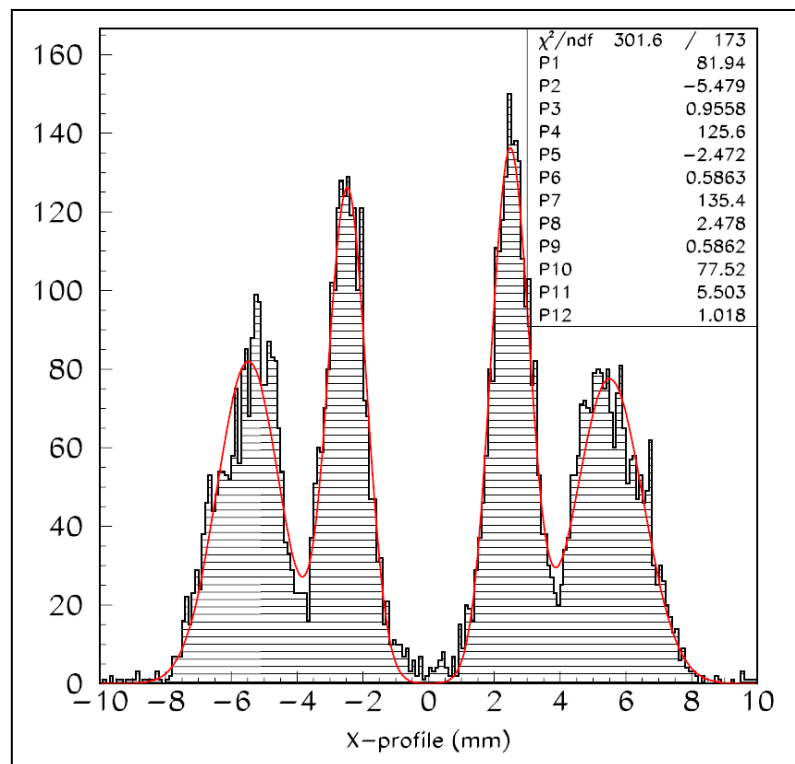


Σχήμα 1.15: Προβολικές εικόνες πειραματικές (συνεχής μπλε γραμμή) και προσομοίωσης (γαλάζιο φόντο) του ομοιώματος των τεσσάρων τριχοειδών για πέντε διαφορετικές αποστάσεις F ομοιώματος-κατευθυντήρα.

Στο Σχήμα 1.16 παρουσιάζεται ενδεικτικά η περίπτωση της απόστασης των 0mm. Εκτελώντας παρεμβολή τεσσάρων γκαουσιανών κατανομών (της μορφής $f(x)=A\exp(-(x-x_0)^2/2\sigma^2)$) στα δεδομένα (μια γκαουσιανή για κάθε σωληνοειδές) λαμβάνονται τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στο ίδιο σχήμα και στον Πίνακα 1.3.

	1	2	3	4
A	82	126	135	78
X ₀	-5.48	-2.47	2.48	5.50
σ	0.96	0.59	0.59	1.02

Πίνακας 1.3: Τα αποτελέσματα της παρεμβολής τεσσάρων γκαουσιανών κατανομών (της μορφής $f(x)=A\exp(-(x-x_0)^2/2\sigma^2)$) στις προβολές των σωληνοειδών για την απόσταση των 0mm.



Σχήμα 1.16: Προβολή των κατανομών των τεσσάρων σωληνοειδών για την απόσταση των 0mm. Με κόκκινο χρώμα είναι η παρεμβολή τεσσάρων γκαουσιανών κατανομών στα δεδομένα. Στο πλαίσιο πάνω δεξιά φαίνονται τα αποτελέσματα της παρεμβολής.

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι τα δύο ακραία σωληνοειδή παρουσιάζουν τιμή εύρους σ περίπου στο 1.0mm ενώ τα δύο ενδιάμεσα παρουσιάζουν μικρότερες τιμές περίπου στο 0.60mm αν και όλα τα σωληνοειδή έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός να έχει πέσει τμήμα κάποιων σωληνοειδών σε διάφραγμα (έχουν την ίδια τάξη μεγέθους με αυτά) και αυτό να έχει περιορίσει το εύρος της προβολής τους.

Συνοψίζοντας αναφέρουμε ότι οι σημαντικότερες ιδιότητες των πιο βασικών τύπων κατευθυντήρων μελετήθηκαν θεωρητικά, σε επίπεδο προσομοίωσης και πειραματικά. Ο συνδυασμός όλων των αποτελεσμάτων και η σύγκριση τους βοήθησε στην βαθύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων τους και στην γνώση της εξάρτησης της διακριτικής ικανότητας και της ευαισθησίας του συστήματος από τα χαρακτηριστικά τους και τις συνθήκες του εκάστοτε πειράματος.

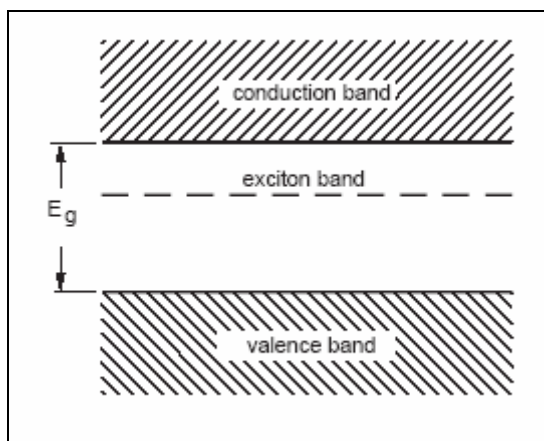
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανίχνευση Ακτινοβολίας - Σπινθηριστές

Οι σπινθηριστές είναι υλικά που μετατρέπουν ενέργεια την οποία απορροφούν από γ -ακτινοβολία σε σπινθήρες, δηλαδή φωτόνια της οπτικής περιοχής τα οποία χάριν απλότητας αποκαλούμε «οπτικά φωτόνια» [FLY02]. Οι σπινθηριστές διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους ανόργανους και τους οργανικούς, που διαφέρουν όχι μόνο στη χημική σύσταση αλλά και στη διαδικασία με την οποία παράγουν τα οπτικά φωτόνια. Το κεφάλαιο αυτό θα αναφερθεί μόνο στους ανόργανους σπινθηριστές οι οποίοι χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στην ανίχνευση ακτινοβολιών στον τομέα της ιατρικής απεικόνισης.

2.1. Ανόργανοι σπινθηριστές

Η φωτεινότητα στους ανόργανους σπινθηριστές είναι κυρίως ιδιότητα του κρυστάλλου. Δεν παρατηρείται σε υγρά ή αέρια, εκτός από κάποια αδρανή αέρια στα οποία είναι ατομική ή μοριακή ιδιότητα. Οι ανόργανοι σπινθηριστές είναι κρυσταλλικά υλικά στα οποία η φωτεινότητα προέρχεται από κέντρα εκπομπής μέσα στα ίδια τα υλικά ή καθορίζεται από κέντρα ενεργοποίησης που εισάγονται στα υλικά αυτά σε συγκεκριμένες ποσότητες.

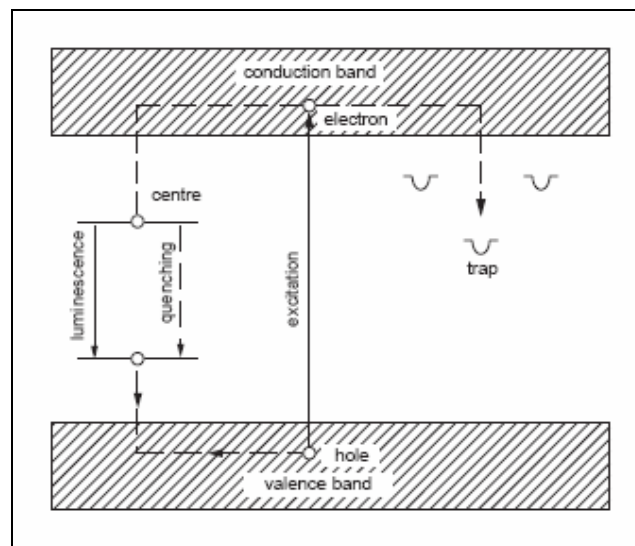


Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ενεργειακής ζώνης σε ανόργανο σπινθηριστή.

Οι κρυσταλλικοί σπινθηριστές κρυστάλλοι είναι είτε μονωτές είτε ημιαγωγοί οι οποίοι έχουν ενεργειακό χάσμα μερικών eV μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας (Σχήμα 2.1). Κάτω από την επίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους μπορούν να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια για να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω θετικά φορτισμένα ιόντα ή θετικές οπές. Ο κρυστάλλος είναι τότε ιονισμένος και φωτοαγωγός. Αν η ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα ηλεκτρόνιο δεν είναι αρκετή για να μεταβεί αυτό στη ζώνη αγωγιμότητας τότε μένει δεσμευμένο σε μια θετική οπή, ενεργειακής στάθμης λίγο χαμηλότερης από τη ζώνη αγωγιμότητας. Το ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής ονομάζεται στην περίπτωση αυτή «exciton».

Η περιγραφή αυτή ισχύει μόνο σε έναν τέλειο κρύσταλλο. Ατέλειες εξαιτίας παραμορφώσεων του πλέγματος του κρυστάλλου ή μη καθαρότητας του από διάφορες προσμίξεις μπορούν να δημιουργήσουν πρόσθετα ενεργειακά επίπεδα στο ενεργειακό χάσμα στα οποία μπορούν να μεταφερθούν είτε «excitons» του χάσματος είτε ηλεκτρόνια από τη ζώνη αγωγιμότητας (Σχήμα 2.2). Αυτά τα πρόσθετα επίπεδα αντιστοιχούν σε κέντρα ενεργοποίησης και μπορούν να διαχωριστούν σε 3 κατηγορίες:

- Στα *κέντρα φωτεινότητας*, στα οποία επανασύνδεση ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής φέρνει το κέντρο σε μια διεγερμένη κατάσταση από την οποία επιστρέφει στη βασική στάθμη με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίου. Το φαινόμενο αυτό λέγεται φθορισμός. Η επανασύνδεση του ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής που διεγείρει το κέντρο οφείλεται είτε στο φαινόμενο αρπαγής είτε στο «exciton» είτε σε ταυτόχρονη αρπαγή ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη αγωγιμότητας και μιας οπής από τη ζώνη σθένους.
- Στα *κέντρα απόσβεσης*, τα οποία λειτουργούν όπως τα κέντρα φωτεινότητας εκτός από το ότι η ενέργεια διέγερσης εκλύεται ως με φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας (θερμικά φωτόνια).
- Στις *παγίδες* που είναι μετασταθή επίπεδα στα οποία ηλεκτρόνια και οπές ή «excitons» μπορούν να παραμείνουν για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πριν να αποκτήσουν αρκετή θερμική ενέργεια είτε για να επιστρέψουν στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους είτε να μεταβούν σε κέντρα φωτεινότητας ή απόσβεσης. Όταν μεταβούν σε κέντρα φωτεινότητας, η καθυστερημένη εκπομπή φωτονίου που προκύπτει ονομάζεται φωσφορισμός.



Σχήμα 2.2: Διακριτά επίπεδα μέσα στην απαγορευμένη ζώνη εξαιτίας προσμίξεων στον κρύσταλλο.

2.2. Χαρακτηριστικά σπινθηριστών

Οι σπινθηριστές συνήθως χαρακτηρίζονται από τη λαμπρότητά τους, την απόδοσή τους, το φάσμα εκπομπής, την ολοκληρωτική κβαντική αποδοτικότητα και το χρόνο απόκρισης.

Λαμπρότητα (scintillation effectiveness): Συμβολίζεται με ε_s και ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των φωτονίων n_p που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου προς την ενέργεια της ακτινοβολίας E_a που απορροφάται από τον κρύσταλλο στον ίδιο χρόνο και μετριέται σε φωτόνια/MeV. Ισχύει ότι:

$$\varepsilon_s = \frac{n_p}{E_a} \quad (2.1)$$

Απόδοση (scintillation efficiency): Συμβολίζεται με n_s και ορίζεται ως το γινόμενο της λαμπρότητας του κρυστάλλου ε_s με την ενέργεια $h\nu$ των εκπεμπόμενων φωτονίων και μετριέται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%). Ισχύει ότι:

$$n_s = \varepsilon_s \cdot h\nu = \frac{n_p \cdot h\nu}{E_a} \quad (2.2)$$

Βασικό ρόλο σε έναν σπινθηριστή διαδραματίζει η γραμμικότητα της φασματοσκοπίας. Αυτό είναι ένα μέτρο του εύρους ενεργειών για τις οποίες η λαμπρότητα και απόδοση του κρυστάλλου είναι σταθερές. Αυτό το εύρος συνήθως δεν είναι πολύ μεγάλο.

Φάσμα εκπομπής (emission spectrum): Χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους, το λ_m που είναι το μήκος κύματος της κορφής της κατανομής εκπομπής και $\Delta\lambda$ που είναι το FWHM του εύρους της κατανομής εκπομπής. Ένα χρήσιμο μέτρο της συμφωνίας των φασμάτων μεταξύ κρυστάλλου και φωτοπολλαπλασιαστή είναι ο παράγοντας συμφωνίας F_m ο οποίος ορίζεται ως:

$$F_m = \frac{\int_0^{\infty} R_{e,\lambda} \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda} \quad (2.3)$$

όπου $\Phi_{e,\lambda}$ είναι η κατανομή του φάσματος της εκπομπής του σπινθηριστή και $R_{e,\lambda}$ είναι η σχετική φασματική ευαισθησία του φωτοπολλαπλασιαστή, δηλαδή:

$$R_{e,\lambda} = \frac{S_{a,\lambda}}{S_m} \quad (2.4)$$

όπου $S_{a,\lambda}$ ορίζεται από την σχέση 3.18 του κεφαλαίου 3 και S_m είναι η ευαισθησία που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του $S_{a,\lambda}$ με $S_{a,\lambda}$:

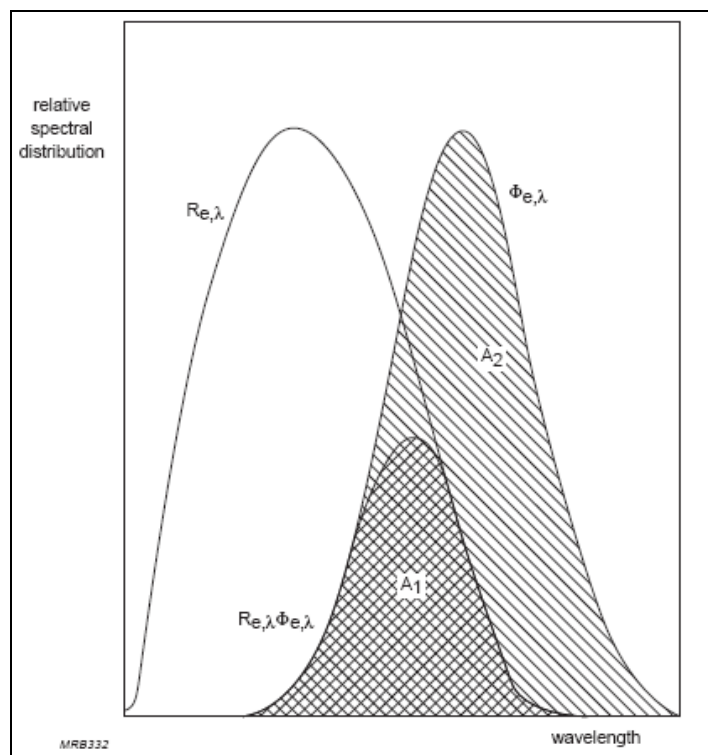
$$S_{a,\lambda}(A/W) = \lim_{d\lambda \rightarrow 0} \frac{dI_a(A)}{d\Phi_e(W)} \quad (2.5)$$

όπου $d\Phi_e$ η μεταβολή της ροής για μεταβολή μήκους κύματος $d\lambda$.

Ο παράγοντας συμφωνίας F_m αντιστοιχεί στον λόγο των εμβαδών A_1/A_2 του Σχήματος 2.3. Επίσης στον Πίνακα 2.1 υπάρχει λίστα του παράγοντα F_m μεταξύ ορισμένων φωτοκαθόδων και φωτός 2856 K από Βολφράμιο.

Τύπος φωτοκαθόδου	S11 S13	Δυναλκαλική	S4	S20	S20R	S1
Παράγοντας ταιριάσματος F_m	0.028	0.018	0.021	0.056	0.126	0.251

Πίνακας 2.1: Παράγοντες συμφωνίας F_m μεταξύ ορισμένων φωτοκαθόδων και φωτός 2856 K από Βολφράμιο.



Σχήμα 2.3: Ορισμός του παράγοντα συμφωνίας $F_m=A_1/A_2$.

Ολοκληρωτική κβαντική απόδοση (IQE – Integral Quantum Efficiency): Ορίζεται για μη-μονοχρωματική ακτινοβολία ως ο λόγος του μέσου αριθμού των εκπεμπόμενων φωτοηλεκτρονίων προς τον μέσο αριθμό των προσπιπτόντων φωτονίων οποιασδήποτε ενέργειας. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$IQE = \frac{hc}{e} \frac{\int_0^{\infty} S_{a,\lambda} \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} \lambda d\lambda} \tag{2.6}$$

όπου $e=1.6 \cdot 10^{-19}$ C, h είναι η σταθερά του Planck και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Χρησιμοποιώντας υλικά που έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν το μήκος κύματος όπως BBQ, Y7 και K27 μερικές τυπικές τιμές IQE φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Τύπος φωτοκαθόδου	IQE
Μονοαλκαλική S11 sBkCs ₃	10-15%
Δυναλκαλική SbKCs	10-15%
Δυναλκαλική (GEBA) SbKCs	12-18%
Τριαλκαλική S20 SbNa ₂ KCs	15-22%

Πίνακας 2.2: Τυπικές τιμές IQE.

Χρόνος απόκρισης: Είναι ένα μέτρο του πλάτους παλμού του σπινθηριστή και συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο που απαιτείται για να σταματήσει το σωματίδιο που ιονίζει ή το φωτόνιο που παράγεται από αυτό. Μετά την απότομη άνοδο του, ο παλμός πέφτει ακολουθώντας ένα σύνθετο νόμο κατά τον οποίο τουλάχιστον δύο παράμετροι μπορούν να ξεχωρίσουν. Αυτοί είναι μια γρήγορη εκθετική διάσπαση (φθορισμός) με σταθερά χρόνου τ (η οποία αναφέρεται και ως χρόνος απόκρισης του σπινθηριστή) και μια πιο αργή διάσπαση (φωσφορισμός, αργοπορημένος φθορισμός) ακολουθώντας έναν πιο περίπλοκο νόμο.

2.3. Ιδιότητες ανόργανων σπινθηριστών

Εκτός από τα ευγενή αέρια και μερικά ειδικά κατασκευασμένα γυαλιά, οι ανόργανοι σπινθηριστές είναι είτε μονοκρυσταλλικοί είτε πολυκρυσταλλικά υλικά. Οι μονοκρύσταλλοι είναι διάφανοι στο φως που εκπέμπουν οι ίδιοι ενώ οι πολυκρύσταλλοι είναι λιγότερο διάφανοι.

Οι μονοκρυσταλλικοί σπινθηριστές βασίζονται σε αλκαλικά αλογόνα εμπλουτισμένα κυρίως από βαριά μέταλλα όπως Θάλιο(Tl) ή Ευρώπιο (Eu): NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na), KI(Tl), CaI₂(Eu) και CaF₂(Eu). Κρύσταλλοι καθαροί χωρίς προσμίξεις από αλκαλικά αλογόνα όπως NaI και CsI είναι επίσης χρήσιμοι.

Άλλοι, πιο πρόσφατα αναπτυγμένοι μονοκρυσταλλικοί σπινθηριστές, είναι CaWO₄, CdWO₄, PbWO₄, ZnWO₄, BaF₂, CsF, CeF₃, Bi₄Ge₃O₁₂ (ή BGO) και οι εμπλουτισμένοι με Ce όπως Gd₂SiO₅:Ce (ή GSO), Lu₂SiO₅ (ή LSO), Y₂SiO₅:Ce (ή YSO) και YAlO₃:Ce (ή YAP).

Οι πολυκρύσταλλοι περιλαμβάνουν και τα εμπλουτισμένα σουλφίδια όπως ZnS(Cu), ZnS(Ag) CdS(Ag) και ZnO(Ga) και το οξείδιο ZnO. Επίσης το NaI(Tl) μερικές φορές χρησιμοποιείται σαν πολυκρύσταλλος. Όντας μερικώς αδιαφανή στο φως που εκπέμπουν οι πολυκρύσταλλοι κυρίως χρησιμοποιούνται σαν λεπτά προπετάσματα τα οποία ανιχνεύουν μόνο βαριά και υψηλού ιονισμού σωματίδια με καλή απόδοση.

Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται οι ιδιότητες μερικών βασικών ανόργανων σπινθηριστών. Σε γενικές γραμμές έχουν κοινές ιδιότητες όπως υψηλή απορρόφηση για φωτόνια γ και X και σωματίδια α και β , καλό ταίριασμα με την φασματική ευαισθησία των

φωτοπολλαπλασιαστών γενικής χρήσης, πρακτικά σταθερή λαμπρότητα σπινθηρισμών σε ευρύ ενεργειακό εύρος και χρονικές σταθερές διάσπασης κυρίως στην περιοχή των μs ή και μικρότερες.

scintillator composition	density (g/cm ³)	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant 1/e (ns)	scintillation pulse height ¹⁾	notes
NaI	3.67	1.78	303	60	190	2)
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	250	100	3)
CsI	4.51	1.95	310	10	6	3)
CsI(Tl)	4.51	1.79	565	1000	45	3)
CsI(Na)	4.51	1.84	420	630	85	3)
⁶ LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1400	35	3)
CaF ₂ (Eu)	3.19	1.44	435	900	50	
BaF ₂	4.88	1.49	190/220 310	0.6 630	5 15	
BGO	7.13	2.15	480	300	10	
ZnWO ₄	7.87	2.2	480	5000	26	
CdWO ₄	7.90	2.3	540	5000	40	
PbWO ₄	8.28	2.16	480	2/7/26	0.8	
CsF	4.65	1.48	390	5	5	3)
CeF ₃	6.16	1.68	300 340	5 20	5	
LSO	7.40	1.81	420	42	75	
GSO	6.71	1.9	440	60	20	
YSO	4.45	1.8	420	35	50	
YAP	5.50	1.9	370	30	40	
ZnS(Ag)	4.09	2.35	450	200	150	4)
ZnO(Ga)	5.61	2.02	385	0.4	40	4)

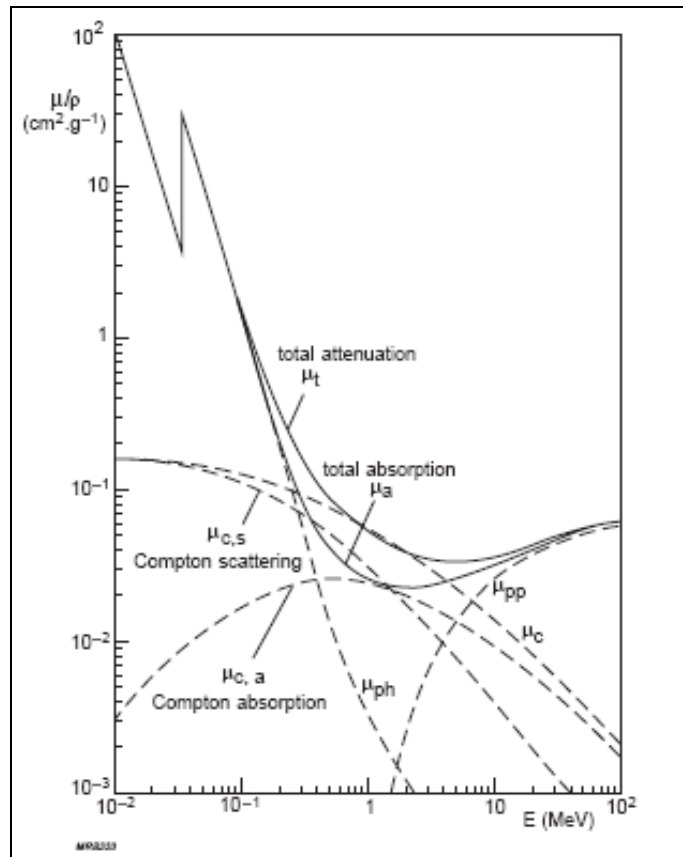
¹⁾ relative to NaI(Tl) ²⁾ at 80 K ³⁾ hygroscopic ⁴⁾ polycrystalline

Πίνακας 2.3: Ιδιότητες μερικών ανόργανων σπινθηριστών [FLY02].

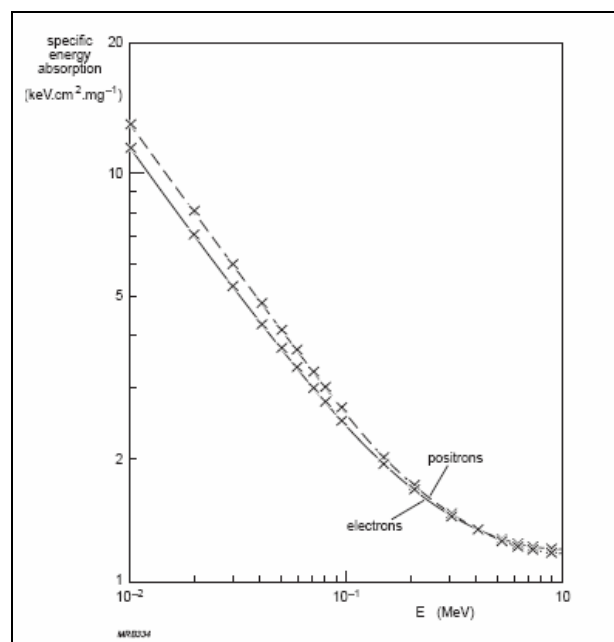
Η λίστα των ανόργανων σπινθηριστών αυξάνεται κάθε χρόνο και ερευνητές σε όλο τον κόσμο προσπαθούν να αναπτύξουν νέα βαριά, μη υγροσκοπικά υλικά σπινθηριστών τα οποία θα έχουν φτηνό κόστος παραγωγής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον πρόσφατα παρουσιάζεται στα φθοριούχα ThF₄, BaLiF₃, LiYbF₄, BaYb₂F₄ και PbF₂. Στην πυρηνική ιατρική ιδιαίτερη προσπάθεια αφιερώνεται στα συστήματα PET για να αναπτυχθούν ανόργανοι σπινθηριστές βαρύτεροι και γρηγορότεροι από τα LSO και BGO.

Απορρόφηση ακτινοβολίας: Εξαιτίας τη υψηλής τους πυκνότητας (3 με 4 g/cm³) και τον υψηλό ατομικό αριθμό (Z=53) του ιωδίου, οι μονοκρύσταλλοι των ιωδιούχων αλκαλίων είναι κατάλληλοι στην ανίχνευση φωτονίων X και γ (Σχήμα 2.4). Επίσης, είναι καλοί απορροφητές ηλεκτρονίων και βαρέων φορτισμένων σωματιδίων (σωμάτια α, πρωτόνια κ.α. – Σχήματα 2.5 και 2.6). Επιπλέον, η μεγάλη ενεργός διατομή απορρόφησης νετρονίων του ⁶Li κάνει το

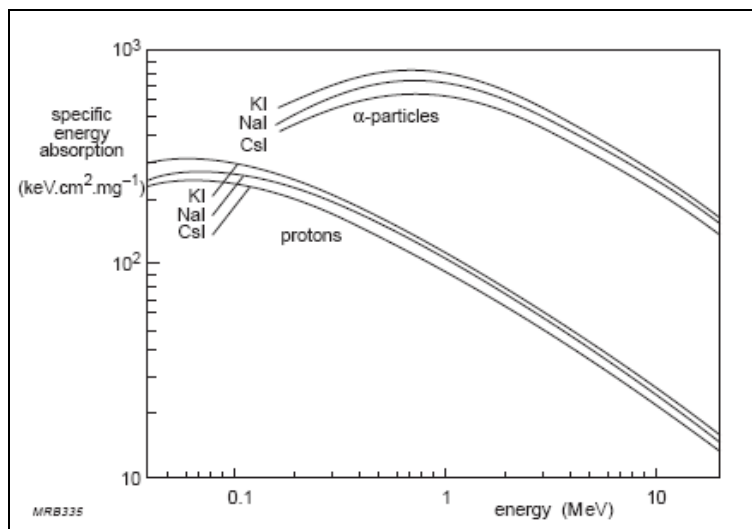
${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ έναν αποδοτικό ανιχνευτή νετρονίων. Μείγματα του ZnS με ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{235}\text{U}$ είναι πολύ καλοί ανιχνευτές θερμικών νετρονίων.



Σχήμα 2.4: Μαζικοί συντελεστές εξασθένισης και απορρόφησης για ακτινοβολία X και γ σε NaI(Tl).

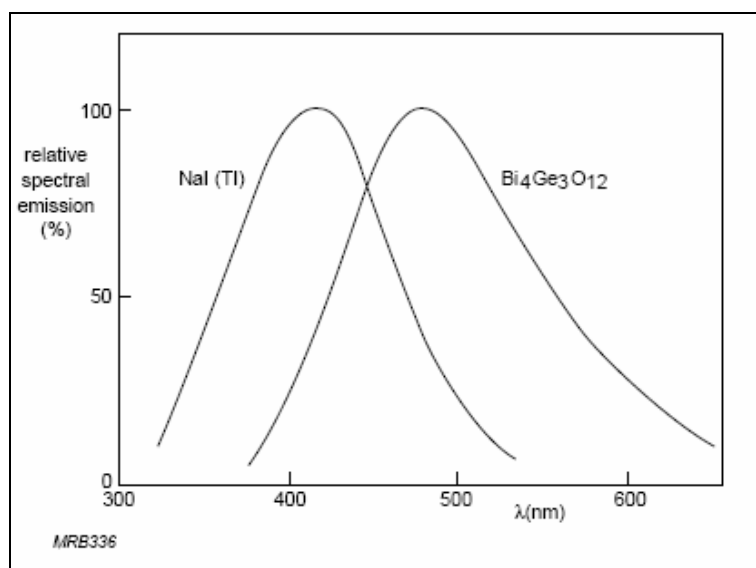


Σχήμα 2.5: Ειδική ενεργειακή απορρόφηση για ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια σε καθαρό NaI σε συνάρτηση με την ενέργεια τους [FLY02].



Σχήμα 2.6: Ειδική ενεργειακή απορρόφηση για φορτισμένα σωμάτια α και πρωτόνια σε καθαρούς KI, NaI και CsI σπινθηριστές.

Φάσμα εκπομπής: Οι ανόργανοι σπινθηριστές συνήθως έχουν δύο ζώνες εκπομπής: Η πρώτη οφείλεται στον ενεργοποιητή και η δεύτερη, η οποία εμφανίζεται σε μικρότερο μήκη κύματος, οφείλεται στο πλέγμα του κρυστάλλου (όπως φαίνεται στους καθαρούς και εμπλουτισμένους κρυστάλλους NaI και CsI του Πίνακα 2.3). Η σχετική ένταση της εκπομπής που οφείλεται στο κρυσταλλικό πλέγμα μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό της πρόσμιξης. Σε αρκετά υψηλές προσμίξεις (ενδεικτικά 0.1% με 0.5% Tl στο NaI) μόνο η εκπομπή που οφείλεται στον ενεργοποιητή είναι πρακτικώς σημαντική. Στο Σχήμα 2.7 συγκρίνεται το φάσμα εκπομπής του εμπλουτισμένου με Tl κρυστάλλου NaI ($\lambda_m=410\text{nm}$) και του καθαρού $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ($\lambda_m=480\text{nm}$) ή αλλιώς BGO.

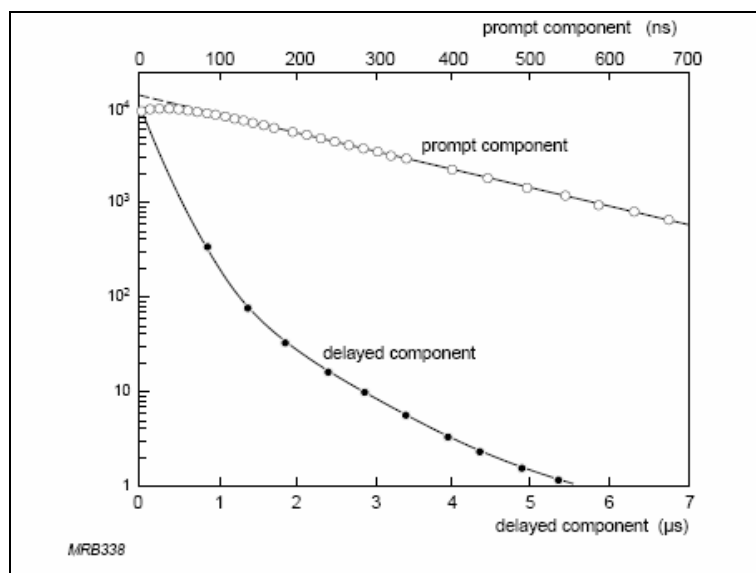


Σχήμα 2.7: Κανονικοποιημένο φάσμα εκπομπής του NaI(Tl) και $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$.

Απόδοση σπινθηριστή: Η απόδοση των περισσότερων σπινθηριστών που χρησιμοποιούνται στη φασματομετρία ακτινοβολιών μπορεί να θεωρηθεί σταθερή σε μεγάλο εύρος ενεργειών. Όμως, 15% με 20% αύξηση της απόδοσης στο χαμηλο-ενεργειακό όριο του εύρους παρατηρείται συχνά. Από τους μονοκρυσταλλικούς ανιχνευτές, οι αποδόσεις των NaI και CsI είναι οι περισσότερο γνωστές. Το NaI(Tl) έχει απόδοση περίπου 13%, εκπέμποντας τέσσερα ή πέντε φωτόνια των 3eV μέσης ενέργειας ανά 100eV απορροφούμενης ενέργειας. Το ZnS έχει την υψηλότερη απόδοση από κάθε μονοκρυσταλλικό ανιχνευτή. Οι ZnS(Ag) και ZnS(Cu) έχουν αποδόσεις περίπου του 25% και 30% για σωματία α και περίπου τις μισές για σωματία β. Η απόδοση των περισσότερων σπινθηριστών σαν ανιχνευτές σωματιδίων ποικίλει σύμφωνα με τον τύπο του σωματιδίου που ανιχνεύεται. Οι NaI(Tl) είναι οι πιο αποδοτικοί για πρωτόνια και δευτέρια και λιγότεροι αποδοτικοί για ηλεκτρόνια, σωματία α και βαρέα ιόντα.

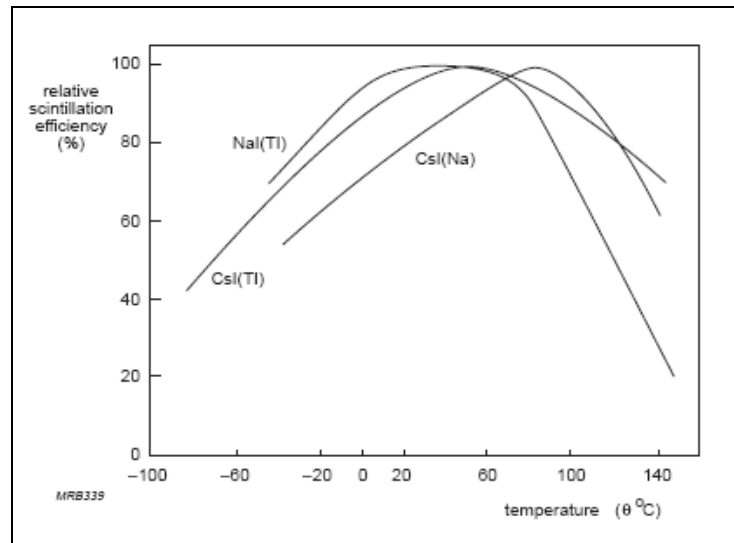
Χρόνος απόκρισης: Η μορφή του παλμού σπινθηρισμού εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του κρυστάλλου, η φύση και η συγκέντρωση του ενεργοποιητή, ο τύπος της ακτινοβολίας που ανιχνεύεται και η θερμοκρασία. Σε γενικές γραμμές, ο χρόνος ανόδου είναι πολύ μικρός, της τάξης των δεκάτων του ns. Ο χρόνος πτώσης μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες (Σχήμα 2.8): μια άμεση εκθετική συνιστώσα σταθεράς χρόνου από μερικές εκατοντάδες ns σε μερικά μs και μια καθυστερημένη συνιστώσα που διαρκεί αρκετά μs.

Στον NaI(Tl) η άμεση συνιστώσα έχει σταθερά διάσπασης περίπου στα 350ns σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις Tl και πέφτει στα 230ns σε συνηθισμένες συγκεντρώσεις Tl (0.1% με 0.5%). Το φαινόμενο κατά το οποίο η αργοπορημένη συνιστώσα συμβάλει περίπου 20% με 40% της ολικής εκπομπής των ανόργανων σπινθηριστών θέτει ένα όριο στην χρήση τους σε υψηλής απόκρισης εφαρμογές.



Σχήμα 2.8: Χρονικές συνιστώσες διάσπασης του NaI(Tl) σπινθηριστή σε γ-ακτινοβολία.

Φαινόμενα θερμοκρασίας: Η θερμοκρασία επηρεάζει την απόδοση του σπινθηριστή, τη χρονική σταθερά του παλμού και το φάσμα εκπομπής. Στο Σχήμα 2.9 φαίνονται οι αποδόσεις των CsI(Tl), CsI(Na) και NaI(Tl) σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.



Σχήμα 2.9: Απόδοση διάφορων ανόργανων σπινθηριστών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Φαίνεται ότι το μέγιστο της απόδοσης του NaI(Tl) είναι ευρύ και παρατηρείται στους 20°C. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη στην πράξη. Για χρήση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ειδικά γρήγοροι φωτοπολλαπλασιαστές είναι εφικτοί παρά την αύξηση της αντίστασης της φωτοκαθόδου.

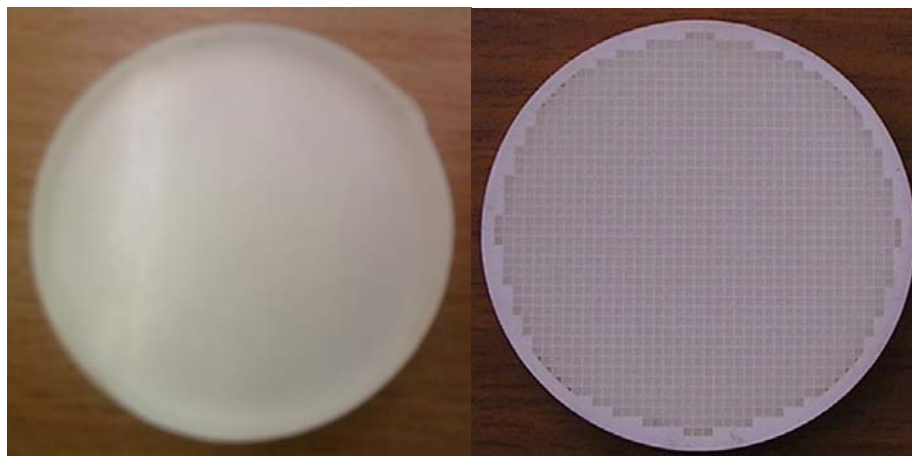
Υγροσκοπία: NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na), CsF, KI(Tl) και ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ είναι όλοι υγροσκοπικοί και πρέπει να είναι ερμητικά κλειστοί. Οι BGO και BaF₂ οι οποίοι δεν είναι υγροσκοπικοί, έχουν υψηλούς συντελεστές απορρόφησης για φωτόνια X και γ και πολύ αργό φθορισμό. Σε μερικές εφαρμογές όπως στο PET οι ιδιότητες αυτές συνεισφέρουν στη σχετικά χαμηλή απόδοση των υλικών αυτών. Ο νέος μη υγροσκοπικός LSO σπινθηριστής, με πολύ μικρότερη χρονική σταθερά διάσπασης από ότι το BGO και με παρόμοιο συντελεστή απώλειας ενέργειας φανερώνει αξιοσημείωτες βελτιώσεις και συνεπώς είναι η πρόσφατη επιλογή σπινθηριστή για τους ανιχνευτές PET. Άλλοι σπινθηριστές βασισμένοι στο Lu όπως επίσης και σε αλογονούχες ενώσεις του La [PAN06], [ILT06] είναι υπό μελέτη σε παγκόσμια κλίμακα.

2.4 Ομογενείς – Διακριτοποιημένοι σπινθηριστές

Οι ομογενείς κρύσταλλοι-σπινθηριστές (Σχήμα 2.10-αριστερά) αποτελούνται από κρυσταλλικό υλικό (μονοκρύσταλλοι) σπινθηρισμών σε όλο τον όγκο τους με αποτέλεσμα τα οπτικά φωτόνια που παράγονται στα υλικά αυτά να διαχέονται στο εσωτερικό τους χωρίς κάποιο περιορισμό. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού και της μη κατευθυντικότητας των παραγόμενων οπτικών φωτονίων, ακόμα και μία σημειακή πηγή οπτικών φωτονίων προβάλλεται με μεγάλο εύρος στο επίπεδο εισόδου του φωτοπολλαπλασιαστή.

Σε αντίθεση με τους ομογενείς, οι διακριτοποιημένοι κρύσταλλοι-σπινθηριστές (Σχήμα 2.10-δεξιά) αποτελούνται από υλικό σπινθηρισμών στο οποίο παρεμβάλλονται λωρίδες από υλικό epoxy. Το υλικό αυτό έχει την ιδιότητα να είναι αδιαφανές στα οπτικά φωτόνια, δηλαδή αυτά να μην το διαπερνούν. Το φαινόμενο αυτό δίνει κατευθυντικότητα στα παραγόμενα οπτικά φωτόνια με αποτέλεσμα, η διάδοση τους να περιορίζεται στην περιοχή του pixel που παράγονται. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μέγεθος του pixel είναι μικρό, της τάξης του mm με αποτέλεσμα η ασάφεια στον προσδιορισμό της θέσης πρόσπτωσης του γ -φωτονίου στον σπινθηριστή να ελαττώνεται σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με τους ομογενείς κρυστάλλους σπινθηριστές. Παρόλα αυτά, καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα, όπως είναι αναμενόμενο, δίνουν οι ομογενείς κρύσταλλοι σπινθηρισμού.

Το σύστημα της γ -Κάμερα είναι εξοπλισμένο με έναν διακριτοποιημένο κρύσταλλο-σπινθηριστή CsI(Tl) και 9 ομογενείς (5 CsI(Tl) και 4 BGO) διαφόρων παχών. Ο διακριτοποιημένος κρύσταλλος έχει εξωτερική διάμετρο 49.5mm, με ενεργή διάμετρο 45mm και πάχος 4mm. Τα pixel του είναι τετράγωνα πλευράς 1mm και epoxy πάχους 0.1mm τα διαχωρίζει μεταξύ τους. Η διάμετρός του διακριτοποιημένου κρυστάλλου περιλαμβάνει συνολικά 44 pixels. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ομογενών κρυστάλλων φαίνονται στον Πίνακα 2.5 (όλοι οι κρύσταλλοι έχουν κυλινδρικό σχήμα διαμέτρου $D=49\text{mm}$ οπότε για την περιγραφή τους αρκεί το πάχος τους). Οι ιδιότητες των υλικών CsI(Tl) και BGO αναφέρονται στον Πίνακα 2.3.

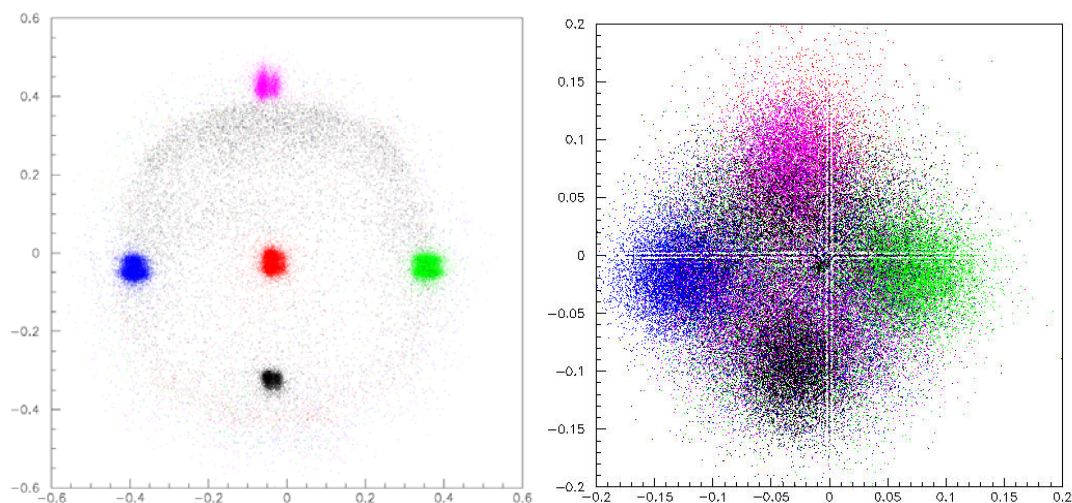


Σχήμα 2.10: **Αριστερά:** Ένας από τους ομογενείς κρυστάλλους CsI(Tl) του συστήματος της γ -Κάμερα **Δεξιά:** Ο διακριτοποιημένος κρύσταλλος CsI(Tl) του συστήματος της γ -Κάμερα.

Υλικό	Πάχος (mm)	Υλικό	Πάχος (mm)
CsI(Tl)	2	BGO	2
CsI(Tl)	4	BGO	3
CsI(Tl)	8	BGO	5
CsI(Tl)	12	BGO	8
CsI(Tl)	20		

Πίνακας 2.5: Γεωμετικά χαρακτηριστικά των ομογενών κρυστάλλων του συστήματος της γ-Κάμερα.

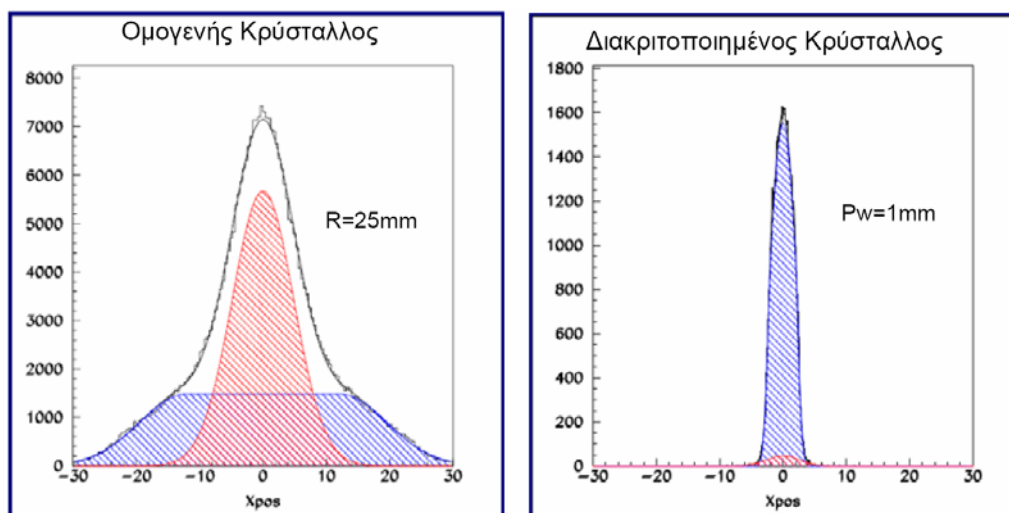
Για να μελετηθούν οι διαφορές ενός διακριτοποιημένου και ενός ομογενούς κρυστάλλου όσον αφορά την προβολική χωρική διακριτική ικανότητα, εκτελείται το ίδιο πείραμα και για τα δύο είδη κρυστάλλων κατά το οποίο ακτινοβολούνται από λεπτή δέσμη ^{99m}Tc . Η ακτινοβόληση γίνεται σε πέντε περιοχές του κρυστάλλου, μία στο κέντρο και τέσσερις στην περιφέρεια. Οι παραγόμενες προβολικές εικόνες, για τον διακριτοποιημένο και τον ομογενή CsI(Tl) πάχους 4mm, φαίνονται στο Σχήμα 2.11. Παρατηρούμε ότι ενώ στον διακριτοποιημένο τα 5 σημεία διακρίνονται καθαρά, στον ομογενή, το οπτικό πεδίο είναι αρκετά συρρικνωμένο (μικρότερο από το μισό του διακριτοποιημένου) και τα σημεία αλληλοεπικαλύπτονται και δεν διαχωρίζονται μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη διάχυση των οπτικών φωτονίων που αναφέρθηκε προηγουμένως ότι συμβαίνει στο εσωτερικό ενός ομογενούς κρυστάλλου-σπινθηριστή. Άρα παρατηρήθηκε και πειραματικά ότι η χωρική διακριτική του συστήματος είναι καλύτερη χρησιμοποιώντας διακριτοποιημένους κρυστάλλους αντί για ομογενείς.



Σχήμα 2.11: Προβολική εικόνα, χρησιμοποιώντας διακριτοποιημένο (αριστερά) και ομογενή (δεξιά) κρύσταλλο CsI(Tl) πάχους 4mm, ύστερα από ακτινοβόληση τους από λεπτή δέσμη ^{99m}Tc σε 5 περιοχές της επιφάνειάς τους.

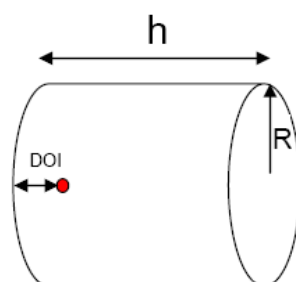
Οπτικές προσομοιώσεις που έχουν γίνει χρησιμοποιώντας το λογισμικό DETECT2000 [MOI00], έδειξαν ότι η κατανομή των οπτικών φωτονίων στην επιφάνεια του σπινθηριστή

που βρίσκεται σε επαφή με τον φωτοπολλαπλασιαστή (επιφάνεια ανίχνευσης) περιγράφεται από γκαουσιανή κατανομή όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.12. Ειδικότερα, περιγράφεται από το άθροισμα 2 γκαουσιανών κατανομών διαφορετικού εύρους και ύψους για τις οποίες θα γίνει λεπτομερή αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο. Επιπλέον επιβεβαιώθηκε ότι στην περίπτωση των διακριτοποιημένων κρυστάλλων το εύρος είναι μικρότερο από ότι στους ομογενείς [POL08], [MIK08].



Σχήμα 2.12: Κατανομή των οπτικών φωτονίων, στην επιφάνεια ανίχνευσης στην περίπτωση ομογενή (αριστερά) και διακριτοποιημένου (δεξιά) κρυστάλλου όπως προκύπτει από το πρόγραμμα προσομοίωσης DETECT2000.

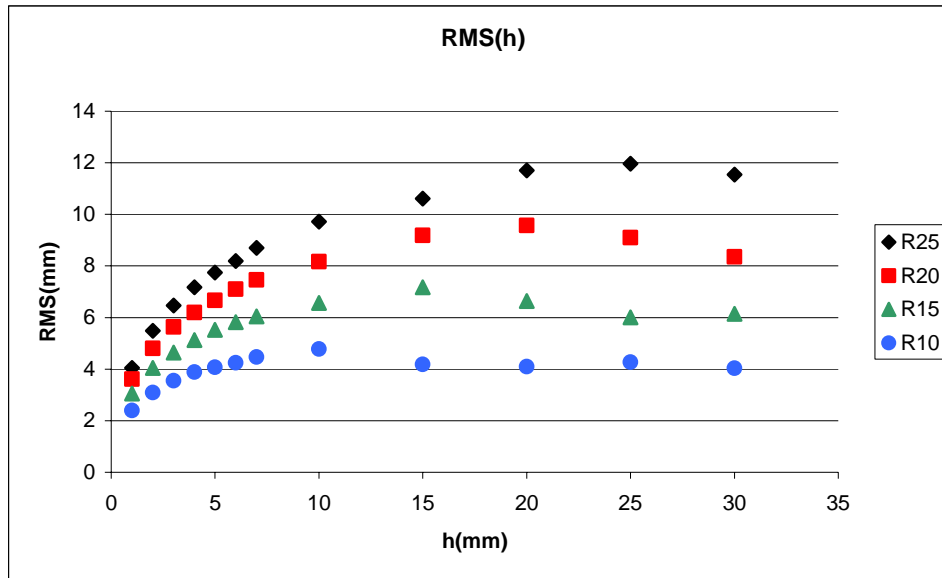
Για να μελετηθεί η επίδραση των διαστάσεων του κρυστάλλου στη κατανομή των οπτικών φωτονίων περιγράφηκε η γεωμετρία του Σχήματος 2.13 με τη βοήθεια του προγράμματος DETECT2000. Το πρόγραμμα εκτελέστηκε για διαφορετικές αποστάσεις πηγής (κόκκινο σημείο) – ανιχνευτικής επιφάνειας, η οποία είναι ίση με (h-DOI), διατηρώντας το DOI σταθερό και ίσο με 0.1mm και μεταβάλλοντας το ύψος του κυλίνδρου h για διαφορετικές ακτίνες R του κυλινδρικού κρυστάλλου-σπινθηριστή.



Σχήμα 2.13: Η γεωμετρική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα DETECT2000 για τη μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων του κρυστάλλου στην κατανομή των οπτικών φωτονίων. Με κόκκινο χρώμα είναι η πηγή ενώ η ανιχνευτική επιφάνεια (δεξιά βάση κυλίνδρου) απέχει (h-DOI) από την πηγή.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στη γραφική παράσταση του Σχήματος 2.14. Παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει το ύψος h του κυλίνδρου τόσο μεγαλώνει το εύρος RMS της κατανομής

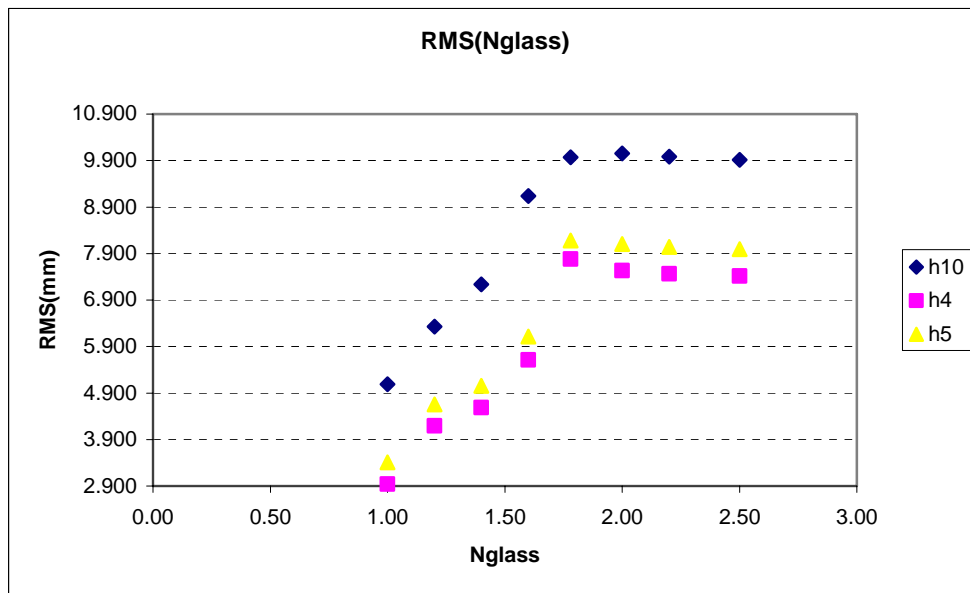
των οπτικών φωτονίων στην ανιχνευτική επιφάνεια, μέχρι κάποια οριακή τιμή. Η οριακή αυτή τιμή του h είναι περίπου ίση με την ακτίνα R του κρυστάλλου. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η ακτίνα R του κυλίνδρου τόσο αυξάνονται οι τιμές του εύρους και η αναλογία αυτή είναι σχεδόν γραμμική [MIK10].



Σχήμα 2.14: Μεταβολή του εύρους RMS της κατανομής των οπτικών φωτονίων σε συνάρτηση με το ύψος h του κυλινδρικού κρυστάλλου για διαφορετικές τιμές της ακτίνας του R (σε mm).

Για τη μελέτη της εξάρτησης της κατανομής των οπτικών φωτονίων από το δείκτη διάθλασης του παραθύρου εισόδου, έγιναν πάλι οπτικές προσομοιώσεις στις οποίες προστέθηκε ένας δεύτερος μικρός κύλινδρος (περιγράφει το οπτικό παράθυρο) σε επαφή με τον προηγούμενο μεγάλο κύλινδρο (ο οποίος περιγράφει τον κρύσταλλο). Οι δύο κύλινδροι έχουν ίση ακτίνα ίση με 25mm. Το ύψος του μικρού κυλίνδρου διατηρήθηκε σταθερό και ίσο με $h'=1$ mm ενώ ο μεγάλος κύλινδρος πήρε τρεις διαφορετικές τιμές $h=4$ mm, 5mm και 10mm. Επίσης ο δείκτης διάθλασης του CsI(Tl) είναι ίσος με $n=1.78$ και διατηρήθηκε σταθερός.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στη γραφική παράσταση του Σχήματος 2.15. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του κρυστάλλου τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της κατανομής των οπτικών φωτονίων για όλες τις τιμές του δείκτη διάθλασης του παραθύρου. Επιπλέον για συγκεκριμένη τιμή του ύψους h παρατηρείται ότι για μικρότερες τιμές του δείκτη διάθλασης του παραθύρου από αυτόν του κρυστάλλου (δηλαδή όσο το παράθυρο είναι οπτικά αραιότερο υλικό από τον κρύσταλλο), όσο αυξάνεται ο δείκτης διάθλασης του παραθύρου και πλησιάζοντας τον αντίστοιχο του κρυστάλλου τόσο αυξάνεται το εύρος της κατανομής. Όμως, όταν ο δείκτης διάθλασης του παραθύρου γίνει μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του κρυστάλλου (δηλαδή όταν το παράθυρο είναι οπτικά πυκνότερο από τον κρύσταλλο) τότε το εύρος παραμένει πρακτικά σταθερό εξαιτίας της ολικής ανάκλασης των οπτικών φωτονίων στη διαχωριστική επιφάνεια κρυστάλλου-παραθύρου.



Σχήμα 2.15: Μεταβολή του εύρους RMS της κατανομής των οπτικών φωτονίων σε συνάρτηση με το δείκτη διάθλασης n (Nglass) του γυαλιού του παραθύρου εισόδου για διαφορετικές τιμές του ύψους h (σε mm) του κρυστάλλου.

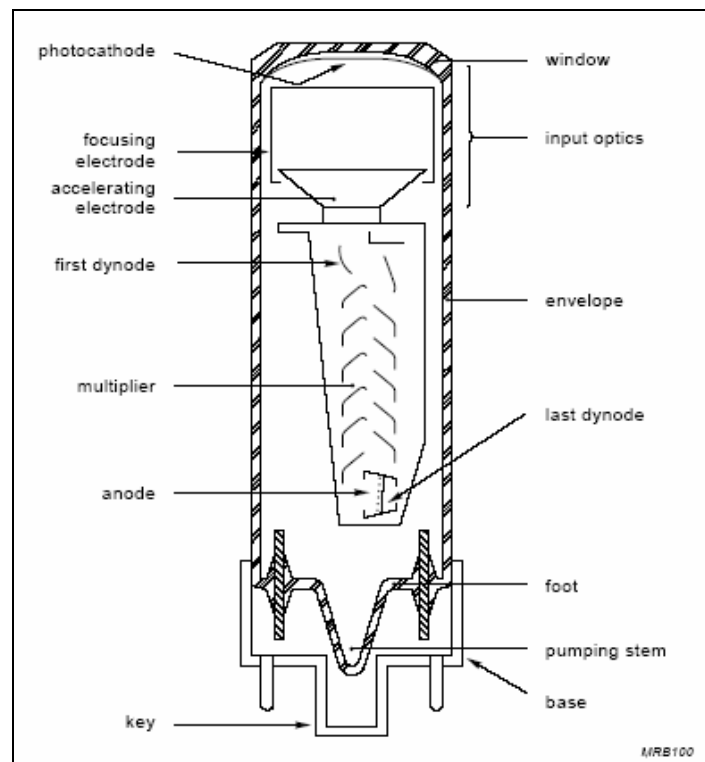
Συνοψίζοντας, από τις οπτικές προσομοιώσεις αποδείχθηκε ότι η κατανομή των οπτικών φωτονίων μπορεί στη γενικότερη περίπτωση να περιγραφεί από το άθροισμα 2 γκαουσιανών κατανομών, συμπέρασμα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης το εύρος της κάθε κατανομής εξαρτάται κατά κύριο λόγο τόσο από τις διαστάσεις όσο και από το είδος των κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Φωτοπολλαπλασιαστές

Ένας φωτοπολλαπλασιαστής μετατρέπει το φως ορατής συνήθως περιοχής βάσει του φωτοηλεκτρικού φαινομένου σε ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια το ενισχύει με παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων [FLY02]. Στην εικόνα του Σχήματος 3.1 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του τα οποία είναι:

- Φωτοκάθοδος στην οποία η ροή του φωτός μετατρέπεται σε ροή ηλεκτρονίων.
- Ηλεκτρο-οπτικό σύστημα εισόδου που εστιάζει και επιταχύνει τη ροή των ηλεκτρονίων.
- Ηλεκτρικός πολλαπλασιαστής ο οποίος αποτελείται από σειρά ηλεκτροδίων (δύνοδοι).
- Άνοδος η οποία συλλέγει την ενισχυμένη ροή ηλεκτρονίων από τον πολλαπλασιαστή και παρέχει το εξαγόμενο σήμα.



Σχήμα 3.1: Στοιχεία ενός κοινού φωτοπολλαπλασιαστή.

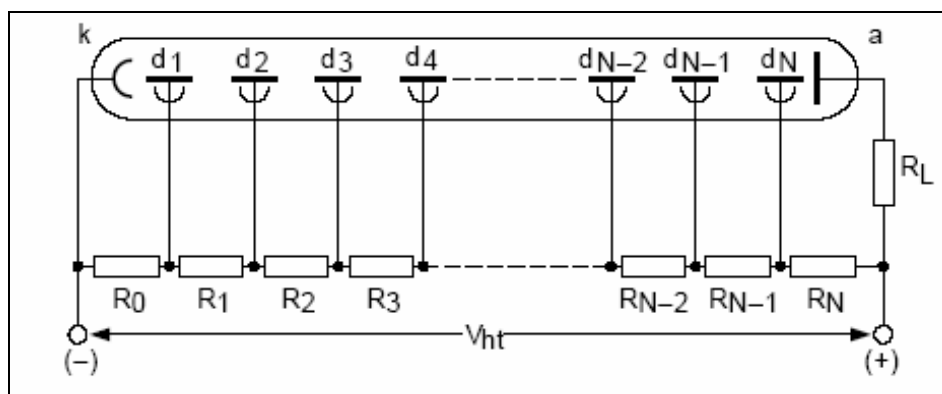
Τα δύο φαινόμενα που σχετίζονται με τη λειτουργία ενός φωτοπολλαπλασιαστή είναι φωτοεκπομπή και δευτερογενής εκπομπή ηλεκτρονίων. Κατά την φωτοεκπομπή ένα ποσοστό των προσπίπτων φωτονίων αφήνουν την ενέργειά τους σε δεσμευμένα ηλεκτρόνια του υλικού της φωτοκαθόδου, με αποτέλεσμα μερικά από αυτά να διαφεύγουν. Αν ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην πρώτη δύνοδο είναι n_k και g_i είναι ο παράγοντας

πολλαπλασιασμού της i δυνόδου, τότε ο αριθμός των συνολικών συλλεγόμενων ηλεκτρονίων n_a (για N αριθμό δυνόδων) είναι:

$$n_a = n_k \prod_{i=1}^N g_i \quad (3.1)$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση που έχουμε $g_i=4$ (πρακτικά υψηλή τιμή) για κάθε δύνοδο και $N=10$ συνολικές δυνόδους, τότε υπολογίζεται ότι η συνολική ενίσχυση M του ρεύματος θα είναι $M=4^{10} = 10^6$.

Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και εστιάζονται με τη χρήση ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των δυνόδων το οποίο αποκτάται με τη χρήση διαιρέτη τάσης που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες της υψηλής τάσης (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Η εφαρμογή διαιρέτη τάσης στους ακροδέκτες της υψηλής τάσης.

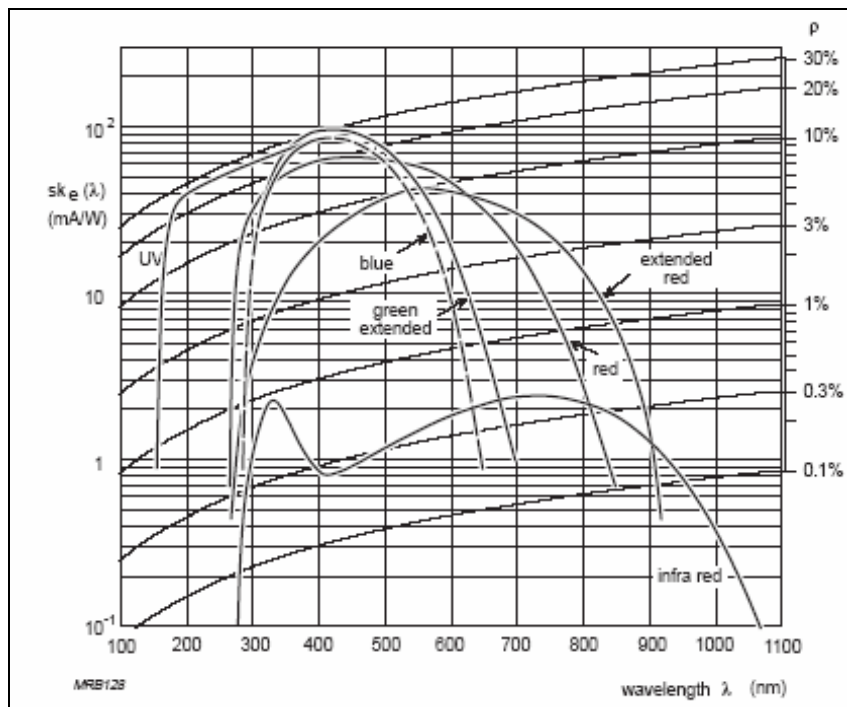
3.1 Φωτοκάθοδος

Οι φωτοκάθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται στους φωτοπολλαπλασιαστές αποτελούνται από επίστρωση φωτοεκπομπού ημιαγωγού. Υπάρχουν δύο είδη καθόδων που χρησιμοποιούνται, οι ημιδιαφανείς και οι αδιαφανείς. Οι ημιδιαφανείς, που χρησιμοποιούνται και περισσότερο, τοποθετούνται στην εσωτερική επιφάνεια του παραθύρου του φωτοπολλαπλασιαστή. Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την αντίθετη πλευρά από αυτήν που προσπίπτει το φως. Η κάθοδος στην περίπτωση αυτή μπορεί να είναι μεγάλη (από δέκα σε μερικές δεκάδες mm σε διάμετρο) και το παράθυρο στο οποίο τοποθετείται μπορεί να είναι επίπεδο ή καμπυλωμένο. Οι αδιαφανείς επιστρώνονται σε ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο μέσα στο εσωτερικό του φωτοπολλαπλασιαστή και τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την πλευρά στην οποία προσπίπτει το φως. Η επιφάνεια του συνήθως περιορίζεται σε μερικά cm^2 λόγω περιορισμών που εισάγουν τα ηλεκτρόδια εστίασης.

3.1.1 Βασικοί Τύποι Φωτοκαθόδων

Τα πιο συνηθισμένα υλικά φωτοκαθόδων είναι AgOCs, SbCs και τα διακαλικά ή τριακαλικά SbKCs, SbRbCs και $SbNa_2KCs$. Μετρήσεις της ευαισθησίας για διάφορα είδη φωτοκαθόδων σε συνάρτηση με το μήκος κύματος φαίνονται στο Σχήμα 3.3 [FLY02]. Οι καμπύλες αυτές καθορίζουν την φασματική ευαισθησία της φωτοκαθόδου και περιορίζονται

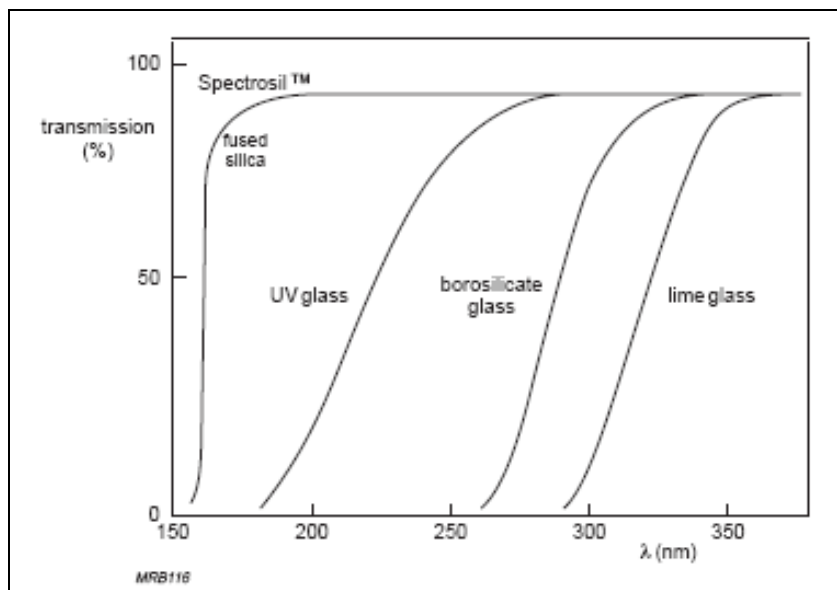
σε συγκεκριμένα όρια. Το άνω όριο, στα μεγάλα μήκη κύματος, προκύπτει εξαιτίας του κατώφλιου (στην ενέργεια) εκπομπής του υλικού και σε μικρά μήκη κύματος εξαιτίας της διαπερατότητας του παραθύρου. Οι καμπύλες ευαισθησίας διαλκαλικών και τριαλκαλικών φωτοκαθόδων μπορούν να μετατοπιστούν προς μεγαλύτερα μήκη κύματος αυξάνοντας το πάχος τους.



Σχήμα 3.3: Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για διάφορα είδη φωτοκαθόδων. Οι καμπύλες κβαντικής απόδοσης ρ επίσης απεικονίζονται ενδεικτικά.

3.1.2 Παράθυρο εισόδου

Το υλικό του παραθύρου εισόδου περιορίζει τη φασματική ευαισθησία θέτοντας ένα κάτω όριο στην περιοχή χαμηλών μηκών κύματος. Στο Σχήμα 3.4 και στον Πίνακα 3.1 δίνονται τα χαρακτηριστικά μερικών γυαλιών που χρησιμοποιούνται. Αυτά είναι κυρίως κατασκευασμένα είτε από πυρίτιο του βορίου (σκληρό γυαλί) είτε από οξειδία του ασβεστίου (μαλακό γυαλί) των οποίων το κατώφλι διαπερατότητας κυμαίνεται μεταξύ 250nm και 300nm. Επίσης κατασκευάζονται και διάφανα γυαλιά στην υπεριώδη ακτινοβολία που έχουν κατώφλι κάτω από τα 250nm. Σε μερικές εφαρμογές τα παράθυρα που οδηγούν σε ημιδιαφανείς φωτοκαθόδους ψύχονται με σκοπό την ελάττωση της ανάκλασης. Ακόμα και με LiF ή MgF_2 , η υπεριώδης ακτινοβολία κάτω από 180nm μπορεί να ανιχνευτεί μόνο στο κενό εξαιτίας της απορρόφησης της από τον αέρα. Για μήκη κύματος μικρότερα από 105nm δεν υπάρχουν διαφανή υλικά συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιούνται φωτοπολλαπλασιαστές χωρίς παράθυρο σε συνθήκες κενού.



Σχήμα 3.4: Διαπερατότητα (%) σαν συνάρτηση του μήκους κύματος λ για διάφορους τύπους γυαλιών που χρησιμοποιούνται στους φωτοπολλαπλασιαστές (για πάχος 3mm).

Type of window	Cut-off wavelength (decrease to 10%) (nm)	Refractive index n at λ (nm)
lime glass	300	1.54 400
borosilicate	270	1.50 400
UV-glass	190	1.49 400
fused silica	160	1.47 400 1.50 250
sapphire (Al_2O_3)	145	1.80 400
MgF_2	115	1.40 400
LiF	105	1.40 400

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων γυαλιών που χρησιμοποιούνται στους φωτοπολλαπλασιαστές [FLY02].

3.2 Ηλεκτρο-οπτικό σύστημα εισόδου

Ο σκοπός του ηλεκτρο-οπτικού συστήματος εισόδου είναι να εστιάζει όλα τα φωτοηλεκτρόνια στην ενεργή περιοχή της πρώτης δυνόδου. Αν η φωτοκάθοδος είναι αδιαφανής το σύστημα εισόδου έχει απλή μορφή και η χρήση έξτρα εστιακών ηλεκτροδίων δεν χρειάζεται, ενώ αν είναι ημιδιαφανής είναι απαραίτητη η χρήση έξτρα εστιακών ηλεκτροδίων (ενός ή περισσότερων) ειδικά στην περίπτωση που είναι μεγάλη σε επιφάνεια. Το ηλεκτρο-οπτικό σύστημα εισόδου πρέπει να ικανοποιεί 2 βασικές απαιτήσεις:

α) Πρέπει να είναι ικανό να εστιάζει το μέγιστο αριθμό ηλεκτρονίων στην πρώτη δύνοδο, ανεξάρτητα από το σημείο παραγωγής τους πάνω στην φωτοκάθοδο. Ο λόγος μεταξύ του αριθμού των ηλεκτρονίων που φτάνουν στην ενεργή περιοχή της πρώτης δυνόδου προς τον

συνολικό αριθμό των παραγόμενων ηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο ονομάζεται απόδοση συλλογής και εξαρτάται από το μήκος κύματος αλλά είναι συνήθως μεγαλύτερος του 80%.

β) Ο χρόνος διέλευσης των ηλεκτρονίων μεταξύ φωτοκαθόδου και της πρώτης δυνόδου πρέπει, όσο είναι δυνατό, να είναι ανεξάρτητος από την αρχική τους ταχύτητα και το σημείο παραγωγής. Αυτό είναι πολύ σημαντικό σε φωτοπολλαπλασιαστές γρήγορης απόκρισης με αποτέλεσμα αυτοί να περιέχουν περισσότερο πολύπλοκα συστήματα εισόδου.

3.2.1 Ηλεκτρικός πολλαπλασιαστής

Οι δύνοδοι από τις οποίες αποτελείται το κύκλωμα του ηλεκτρικού πολλαπλασιαστή είναι τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε τα ηλεκτρικά πεδία που εφαρμόζονται ανάμεσα τους να δίνουν στα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια ενέργεια μερικών εκατοντάδων eV κατά τη διαδρομή τους μέχρι την επόμενη δύνοδο. Συνεπώς ο αριθμός των παραγόμενων ηλεκτρονίων αυξάνει από δύνοδο σε δύνοδο δίνοντας έναν συνολικό παράγοντα πολλαπλασιασμού. Όμως δεν φτάνουν στην επόμενη δύνοδο όλα τα ηλεκτρόνια που παράγονται στη προηγούμενή της. Κάθε ενδο-δυνοδικός χώρος του ηλεκτρικού πολλαπλασιαστή χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή συλλογής n_i . Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού δ_i κάθε δυνόδου i και ο συντελεστής συλλογής n_{i-1} του χώρου που προηγείται της δυνόδου i αυξάνουν με την αύξηση της τάσης V_i μεταξύ των δυνόδων d_{i-1} και d_i (ο ρυθμός αύξησης είναι μεγαλύτερος για τον δ_i από ότι για τον n_{i-1}). Το γινόμενο των n_{i-1} και δ_i εξαρτάται εκθετικά από την εφαρμοσμένη τάση V_i . Δηλαδή:

$$n_{i-1} \cdot \delta_i = k_i \cdot V_i^a \quad (3.2)$$

όπου k_i είναι μια σταθερά και ο εκθέτης a συνήθως μεταβάλλεται μεταξύ 0.65 και 0.75.

Για την έκφραση της ενίσχυσης είναι πιο βολικό να συσχετιστεί ο συντελεστής πολλαπλασιασμού δ_i με τον συντελεστή συλλογής n_i του χώρου που ακολουθεί της δυνόδου i . Έτσι ορίζεται ο συντελεστής ενίσχυσης g_i της δυνόδου i ως:

$$g_i = \delta_i \cdot n_i \quad (3.3)$$

και ο συνολικός συντελεστής ενίσχυσης M ως:

$$M = \prod_{i=1}^N g_i \quad (3.4)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός των δυνόδων.

Η δομή του πολλαπλασιαστή είναι κυρίως επαναληπτική, όλοι οι δύνοδοι (εκτός από, μερικές φορές, τις πρώτες μιας ή δύο και την τελευταία) είναι πανομοιότυπες. Εξαιτίας της μεγάλης καμπύλωσης των τροχιών των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν σε αυτές, το πρώτο ενδο-δυνοδικό διάστημα σχηματίζει μια κρίσιμη σύνδεση μεταξύ του ηλεκτρο-οπτικού συστήματος εισόδου και του επαναληπτικού τμήματος του πολλαπλασιαστή. Για το λόγο

αυτό, υψηλότερες τιμές της τάσης εφαρμόζονται συχνά μεταξύ των πρώτων ενός ή δύο δυνόδων από τις υπόλοιπες.

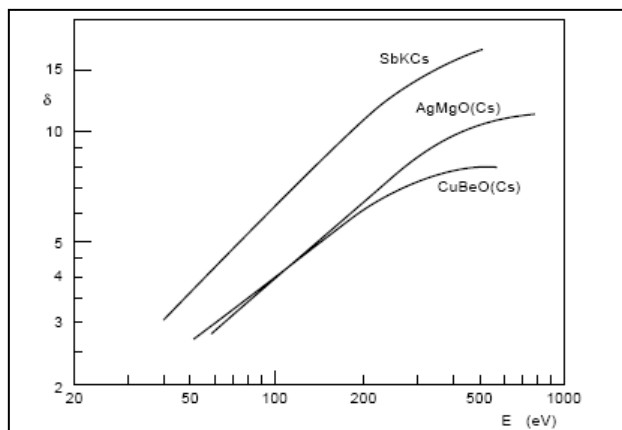
Η ενίσχυση κάθε δυνόδου μεταβάλλεται στατιστικά γύρω από μια μέση τιμή. Συνεπώς και για τη συνολική ενίσχυση M ενός φωτοπολλαπλασιαστή ισχύει το ίδιο, δηλαδή ακολουθεί μια κατανομή πιθανότητας γύρω από μια μέση τιμή $\langle M \rangle$. Έτσι οι μεταβολές της συνολικής ενίσχυσης M μπορούν να μειωθούν είτε αυξάνοντας τον συντελεστή εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων, είτε βελτιώνοντας την ομοιογένεια του συντελεστή εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων, είτε ισοσταθμίζοντας τις αποδόσεις συλλογής των δυνόδων.

Ο χρόνος μεταφοράς των ηλεκτρονίων μεταξύ της πρώτης δυνόδου και της ανόδου επίσης μεταβάλλεται στατιστικώς γύρω από μια μέση τιμή. Η μεταβολή αυτή προέρχεται είτε από διακυμάνσεις στην αρχική ταχύτητα των ηλεκτρονίων, είτε από διακυμάνσεις των τροχιών τους.

Επίσης σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση και το χρόνο μεταφοράς των φωτοπολλαπλασιαστών έχουν το υλικό και η γεωμετρία των δυνόδων.

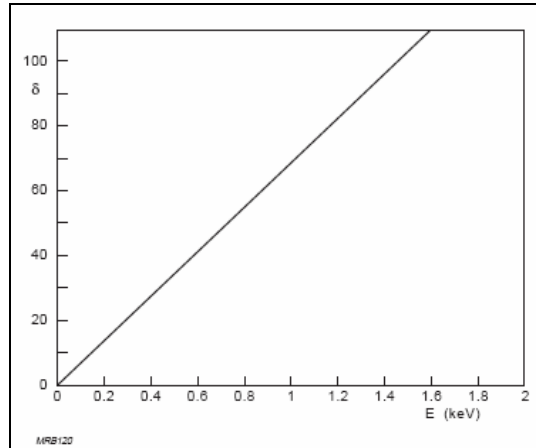
3.2.2 Υλικά δυνόδων

Υλικά με ικανοποιητικούς συντελεστές εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων είναι είτε μονωτές είτε ημιαγωγοί. Για την κατασκευή των δυνόδων, υλικά όπως AgMg , CuBe και NiAl χρησιμοποιούνται συχνά. Τα υλικά αυτά δεν έχουν κατάλληλους συντελεστές εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων, όμως τα οξειδία όπως MgO , BeO και Al_2O_3 , τα οποία μπορούν να επιστρωθούν στην επιφάνεια των δυνόδων. Τα αλκαλικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή φωτοκαθόδων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν την ηλεκτρονική συνάφεια των επιφανειών των δυνόδων. Μερικά υλικά φωτοεκπομποί (κυρίως SbCs_3) είναι επίσης καλοί εκπομποί δευτερογενών ηλεκτρονίων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν, κατά τον ίδιο τρόπο, και για την κατασκευή φωτοκαθόδων και δυνόδων. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται ένα παράδειγμα συντελεστών εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων για μερικές τυπικές επιφάνειες.



Σχήμα 3.5: Εξάρτηση των συντελεστών εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων τριών κοινών υλικών επίστρωσης από την ενέργεια των προσπιπτόντων αρχικών ηλεκτρονίων.

Επίσης ημιαγωγοί αρνητικού τύπου (n) έχουν αναπτυχθεί έτσι ώστε να έχουν υψηλότερους συντελεστές εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων. Ένα τέτοιο υλικό είναι το GaP(Cs) του οποίου ο συντελεστής εκπομπής απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6. για ενέργειες αρχικών ηλεκτρονίων μεταξύ 400eV και 800eV, το υλικό αυτό έχει συντελεστή εκπομπής 20-50.



Σχήμα 3.6: Εξάρτηση του συντελεστή εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων του GaP(Cs) από την ενέργεια των προσπιπτόντων αρχικών ηλεκτρονίων.

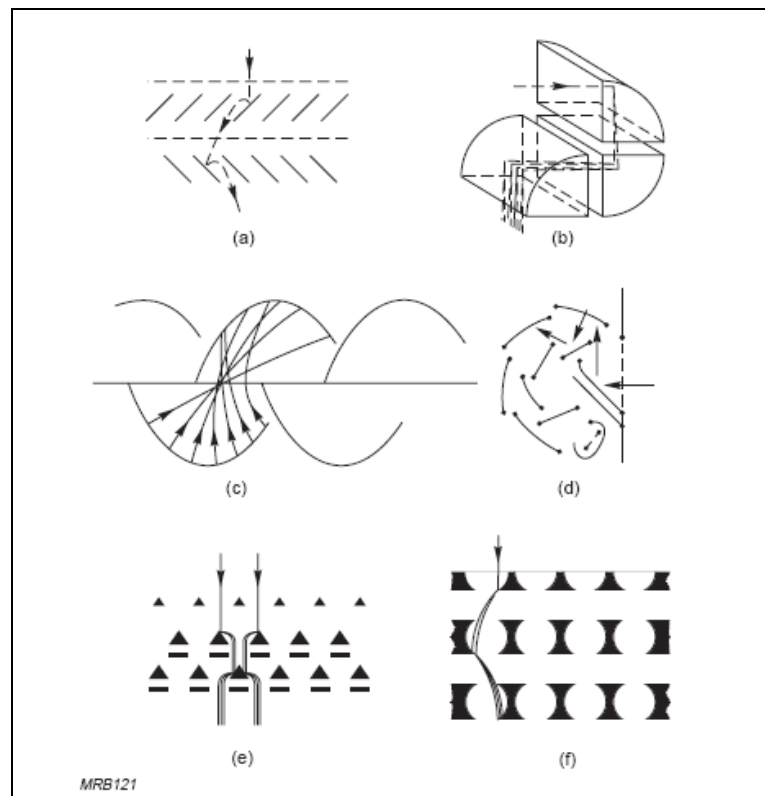
3.2.3 Γεωμετρία δυνόδων

Ανάλογα με τη γεωμετρία τους οι δύνοδοι διακρίνονται κατασκευαστικά στους παρακάτω τύπους:

- «Βενετικές-Τυφλές» δύνοδοι (Σχήμα 3.7a): Αυτές είναι γυμνές με κλίση σε σχέση με τον κεντρικό άξονα του φωτοπολλαπλασιαστή και τοποθετημένες παράλληλα στη φωτοκάθοδο. Η μεγάλη επιφάνεια της πρώτης δυνόδου κάνει δυνατή τη χρήση ενός σχετικά απλού ηλεκτρο-οπτικού συστήματος εισόδου. Η διάταξη αυτή έχει μεγάλη απόδοση συλλογής και σταθερότητα στην τιμή της ενίσχυσης αλλά πολύ μέτρια χρονικά χαρακτηριστικά. Η απόκριση τους είναι αργή εξαιτίας του χαμηλού ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται στην επιφάνεια των δυνόδων τους.
- «Κουτιά» δύνοδοι (Σχήμα 3.7b): Είναι επίσης γνωστές σαν δύνοδοι «κουτιού και πλέγματος». Αυτές έχουν επίσης μεγάλη επιφάνεια συλλογής της πρώτης δυνόδου και συνεπώς μεγάλη απόδοση συλλογής. Όμως το χαμηλό ηλεκτρικό πεδίο στην εσωτερική επιφάνεια των κουτιών οδηγεί σε μέτρια χρονικά χαρακτηριστικά και η απόδοση της συλλογής στην δεύτερη δύνοδο γίνεται σημαντική.
- «Γραμμικές-Εστιακές» δύνοδοι (Σχήμα 3.7c): Οι δύνοδοι αυτές είναι κατασκευασμένες για να παρέχουν υψηλή εστίαση των ηλεκτρονίων κατά τη διαδρομή τους στον φωτοπολλαπλασιαστή. Αυτό μειώνει τις μεταβολές των χρόνων μεταφοράς μεταξύ των δυνόδων με αποτέλεσμα να έχουν πολύ γρήγορη απόκριση. Εξαιτίας της ανάγκης της επίτευξης της καλύτερης σύνδεσης μεταξύ του ηλεκτρο-οπτικού συστήματος εισόδου και

του πολλαπλασιαστή, οι πρώτες δύνοδοι έχουν διαφορετικό σχήμα και διάταξη από τις υπόλοιπες.

- «Κυκλικές-κλωβοί» δύνοδοι (Σχήμα 3.7d): Σε αντίθεση με τις «Γραμμικές-Εστιακές» δυνόδους, αυτή η διάταξη οδηγεί σε φωτοπολλαπλασιαστές εξαιρετικά μικρού μεγέθους.
- «Πλεγματικές» δύνοδοι (Σχήμα 3.7e): Αποτελούνται από παράλληλα επίπεδα λεπτών καλωδίων σε διάταξη πλέγματος. Η απόδοση συλλογής τους από δύνοδο σε δύνοδο είναι χαμηλή, μπορούν όμως να λειτουργήσουν σε μαγνητικό πεδίο της τάξης του 1T. Μια τυπική τιμή της ενίσχυσης είναι περίπου 10^4 για φωτοπολλαπλασιαστή 16 δυνόδων. Επίσης χρησιμοποιούνται σε χωρικά ευαίσθητους φωτοπολλαπλασιαστές λόγω του υψηλού αριθμού διασταυρωμάτων που σχηματίζουν όπου η θέση ενός γεγονότος μπορεί να υπολογιστεί από το κέντρο βάρους των δεδομένων πολλών καναλιών αλλά η διαδικασία αυτή τους κάνει πολύ αργούς για πολλές εφαρμογές.
- Δύνοδοι «Ελασμάτων» (Σχήμα 3.7f): Αποτελούνται από διάτρητα μεταλλικά ελάσματα με καλά καθορισμένα ανοίγματα. Η επιφάνεια συλλογής τους είναι μεγάλη με αποτέλεσμα η απόδοση συλλογής τους να είναι περίπου η ίδια με τις «Βενετικές-Τυφλές» δυνόδους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μαγνητικά πεδία μερικών δεκάδων mT και ο μικρός αριθμός διασταυρωμάτων που έχουν τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν σε χωρικά ευαίσθητους φωτοπολλαπλασιαστές στους οποίους όλα τα σήματα διαβάζονται παράλληλα.

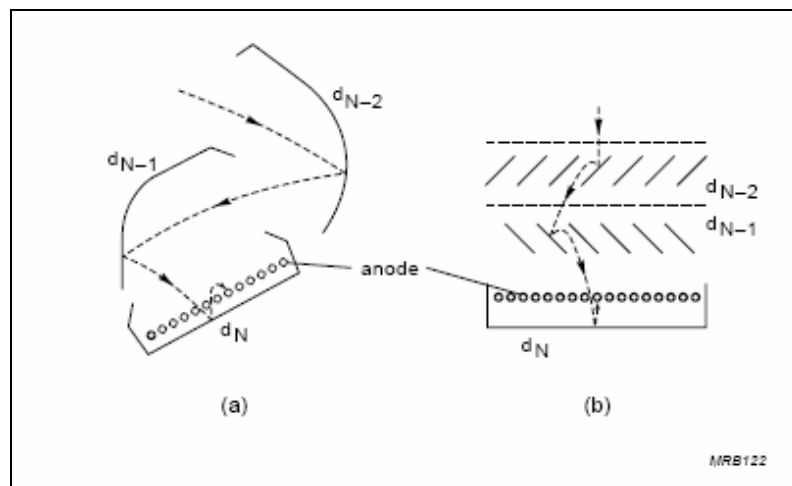


Σχήμα 3.7: Γεωμετρία δυνόδων: a) «Βενετικές-Τυφλές» b) «Κουτιά» c) «Γραμμικές-Εστιακές» d) «Κυκλικές-κλωβοί» e) «Πλεγματικές» και f) «Ελασμάτων».

3.3 Ανοδικός χώρος συλλογής

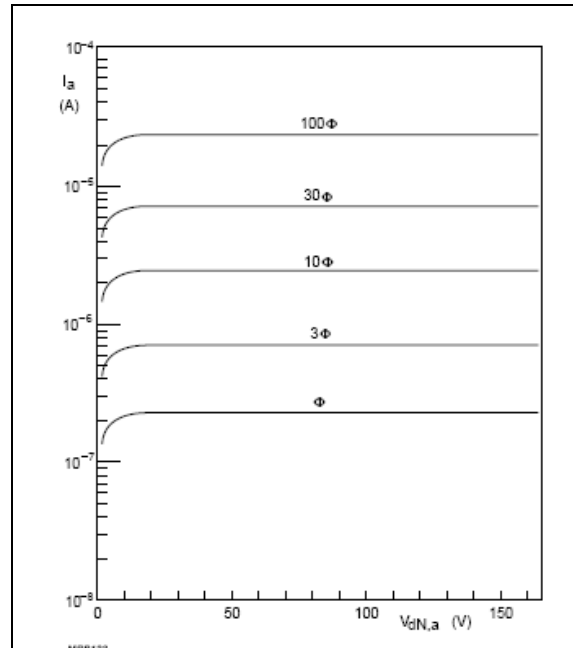
Το σχήμα και η διάταξη των ηλεκτροδίων στο τέλος του πολλαπλασιαστή διαφέρει από τα αντίστοιχα του επαναληπτικού τμήματος. Η γεωμετρία πρέπει να είναι κατάλληλη για να συλλέγει όλα τα δευτερογενή ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται από την τελευταία δύνοδο, για να ελαχιστοποιεί τα χωρικά φαινόμενα φορτίου με αποτέλεσμα την διασφάλιση της γραμμικής απόκρισης σε λειτουργία μορφής παλμών και να προσαρμόζει την εμπέδηση της ανόδου στην χαρακτηριστική εμπέδηση της εξωτερικής σύνδεσης.

Στο Σχήμα 3.8 φαίνονται τα διαστήματα συλλογής δύο φωτοπολλαπλασιαστών γενικής χρήσης. Ο συλλέκτης ή άνοδος είναι ένα πλέγμα τοποθετημένο κοντά στην τελευταία δύνοδο έτσι ώστε τα δευτερογενή ηλεκτρόνια που εκπέμπονται, μόνο από την τελευταία δύνοδο να συλλέγονται και όχι από προηγούμενες. Μια τέτοια διάταξη πρέπει να έχει υψηλό ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ της τελευταίας δυνόδου και της ανόδου και έτσι να μειώσει τα χωρικά φαινόμενα φορτίου. Επιπλέον, η τελευταία δύνodos σχηματίζει μια τμηματική ηλεκτροστατική προστασία γύρω από τον συλλέκτη.



Σχήμα 3.8: Διατάξεις διαστήματος συλλογής: a) με εστιακές δυνόδους b) με «βενετικές-τυφλές» δυνόδους.

Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται ένα παράδειγμα της σχέσης μεταξύ τάσης της τελευταίας δυνόδου-άνοδος και ανοδικού ρεύματος για διάφορες τιμές της σχετικής ροής ηλεκτρονίων. Παρατηρείται ότι το ρεύμα πρακτικά γίνεται σταθερό για τιμές τάσης μεγαλύτερες των 10V. Ο φωτοπολλαπλασιαστής τότε συμπεριφέρεται σαν ένας τέλειος ενισχυτής ρεύματος.



Σχήμα 3.9: Εξάρτηση του ανοδικού ρεύματος από την τάση μεταξύ τελευταίας δυνόδου και ανόδου, για διάφορες τιμές της σχετικής ροής ηλεκτρονίων.

3.4 Βασικά χαρακτηριστικά φωτοπολλαπλασιαστών

Παρακάτω θα αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φωτοπολλαπλασιαστή και ποια η σημασία αυτών. Μερικά από αυτά αναφέρονται σε ολόκληρο τον φωτοπολλαπλασιαστή ενώ άλλα σε ένα μόνο από τα τρία λειτουργικά τμήματα του, την φωτοκάθοδο, το ηλεκτρο-οπτικό σύστημα εισόδου και τον ηλεκτρικό πολλαπλασιαστή με την άνοδο. Σε γενικές γραμμές μπορούν να διαχωριστούν σε 4 κατηγορίες σχετικές με την ευαισθησία, τον χρόνο, το ρεύμα σκότους και την ενεργειακή διακριτική ικανότητα.

3.4.1 Χαρακτηριστικά της φωτοκαθόδου

Ευαισθησία της φωτοκαθόδου S_k

Είναι ο λόγος του καθοδικού ρεύματος I_k (χωρίς το ρεύμα σκότους) προς την εισερχόμενη ροή ακτινοβολίας Φ . Εκφραζόμενη σε μονάδες ακτινοβολίας ονομάζεται ακτινοβολούμενη ευαισθησία φωτοκαθόδου και ορίζεται ως:

$$S_k (A/W) = \frac{I_k (A)}{\Phi_e (W)} \quad (3.5)$$

ενώ εκφραζόμενη σε μονάδες φωτομετρίας ονομάζεται φωτομετρική ευαισθησία φωτοκαθόδου και ορίζεται ως:

$$S_k (A/lm) = \frac{I_k (A)}{\Phi_v (lm)} \quad (3.6)$$

Στις περισσότερες εφαρμογές η ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική αλλά έχει φασματική συνιστώσα με αποτέλεσμα η φωτοκάθοδος να μην είναι ομοιόμορφα ευαίσθητη στην ακτινοβολία. Άρα, σε κάθε αναφορά της ευαισθησίας της φωτοκαθόδου πρέπει να

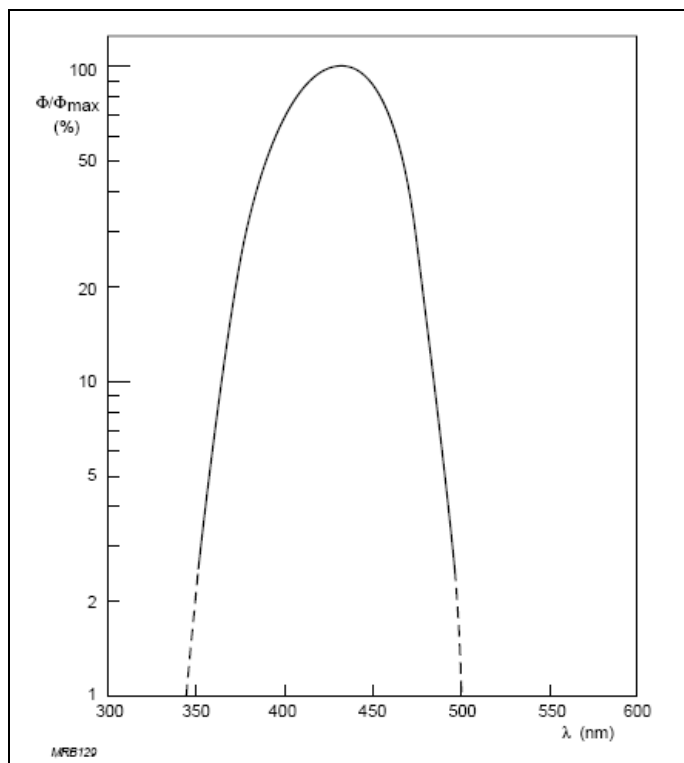
αναφέρεται και η σύσταση του φάσματος της ακτινοβολίας στην οποία μετρήθηκε η ευαισθησία.

Ακτινοβολουόμενη ευαισθησία φωτοκαθόδου: Συνήθως ορίζεται για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος λ . Αν $d\Phi_e$ είναι η μεταβολή της προσπίπτουσας ροής ακτινοβολίας για μήκος κύματος λ και dI_k είναι η αντίστοιχη μεταβολή του ρεύματος της φωτοκαθόδου, τότε η μονοχρωματική ευαισθησία ή απόλυτη φασματική ευαισθησία σε μήκος κύματος λ ορίζεται ως:

$$S_{k,\lambda} = \lim_{d\lambda \rightarrow 0} \frac{dI_k}{d\Phi_e} \quad (3.7)$$

Η σχετική φασματική ευαισθησία είναι ο λόγος της ευαισθησίας σε συγκεκριμένο μήκος κύματος λ προς την ευαισθησία σε μήκος κύματος αναφοράς που είναι συνήθως αυτό στο οποίο η ευαισθησία είναι μέγιστη. Η τιμή αυτή μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τον ένα φωτοπολλαπλασιαστή στον άλλο ακόμα και του ίδιου τύπου, κυρίως στην περιοχή ενεργειών του κατωφλίου φωτοεκπομπής. Για παράδειγμα η ακτινοβολουόμενη ευαισθησία των φωτοκαθόδων τύπου A20 μπορεί να ποικίλει κατά παράγοντα 10 στα 800nm αλλά μόνο κατά παράγοντα 2 στα 450nm.

Φωτομετρική ευαισθησία φωτοκαθόδου: Συνήθως ορίζεται για φασματική σύσταση που είναι τυπική για κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή. Ένας τυπικός διαχωρισμός της είναι η ευαισθησία σε άσπρο και μπλε φως. Η ευαισθησία στο άσπρο φως χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τους φωτοπολλαπλασιαστές οι οποίοι προορίζονται για χρήση στη φωτομετρία. Η χαρακτηριστική φωτεινότητα στην περίπτωση αυτή βασίζεται σε φως από λαμπτήρα νήματος βολφραμίου στη θερμοκρασία των 2856K. Η ευαισθησία στο μπλε φως χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τους φωτοπολλαπλασιαστές οι οποίοι προορίζονται για χρήση ως ανιχνευτές σπινθηρισμών. Η εκπομπή πολλών σπινθηριστών παρουσιάζει μέγιστο στα 430nm περίπου. Αυτή η ευαισθησία επίσης αναφέρεται ως CB (Corning Blue) ευαισθησία και βασίζεται σε φως ενός λαμπτήρα νήματος βολφραμίου θερμοκρασίας 2856K, διερχόμενο από ένα Corning φίλτρο (C.S. No 5-58 - Σχήμα.3.10). Στα εγχειρίδια αυτό αναφέρεται ως «μπλε ευαισθησία» εκφρασμένη σε $\mu\text{A}/\text{lmF}$ (όπου το F υποδεικνύει ότι χρησιμοποιείται φίλτρο – η ίδια μονάδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλα φίλτρα όπως η «κόκκινη ευαισθησία»).



Σχήμα 3.10: Σχετική φασματική ευαισθησία βασισμένη σε φως από νήμα βολφραμίου θερμοκρασίας 2856K διερχόμενο από ένα Corning φίλτρο (CS No58).

Για μια διαλκαλική φωτοκάθοδο (Σχήμα 3.3) ο λόγος του CB προς την «άσπρη» φωτομετρική ευαισθησία είναι:

$$\frac{S_k(C.B.)}{S_k(white)} \approx 0.15 \tag{3.8}$$

Η ακτινοβολούμενη ευαισθησία συνήθως καθορίζεται στα 400nm. Η σχέση μεταξύ CB φωτομετρικής ευαισθησίας και ακτινοβολούμενης ευαισθησίας στα 400nm είναι:

$$\frac{S_k(C.B.)}{S_{k,400}} \approx 0.125 \cdot 10^{-3} (W / lm) \tag{3.9}$$

και οι δύο παραπάνω σχέσεις μπορεί να μεταβάλλονται λίγο για διαφορετικούς φωτοπολλαπλασιαστές.

Η ευαισθησία της φωτοκαθόδου δεν είναι ποτέ ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια της και η ανομοιογένεια που παρουσιάζεται μεταβάλλεται με το μήκος κύματος. Σε κάποιες εφαρμογές είναι πολύ σημαντική η μέτρηση της ανομοιογένειας και της εξάρτησης της από το μήκος κύματος.

Κβαντική απόδοση ρ

Αυτό το χαρακτηριστικό, που είναι ένας άλλος τρόπος έκφρασης της ευαισθησίας της φωτοκαθόδου, είναι ο λόγος του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται n_k προς τον αριθμό των φωτονίων που προσπίπτουν n_p . Συνήθως ορίζεται για μονοχρωματικό φως και σχετίζεται με την απόλυτη φασματική ευαισθησία από την σχέση:

$$\rho = \frac{n_k}{n_p} = S_{k,\lambda} \frac{h\nu}{e} = S_{k,\lambda} \frac{hc}{\lambda e} \quad (3.10)$$

όπου e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, h η σταθερά Planck και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Θέτοντας $hc/e = 1.24 \cdot 10^{-6}$ W/mA έχουμε:

$$\rho(\%) = 124 \frac{S_{k,\lambda}(mA/W)}{\lambda(nm)} \quad (3.11)$$

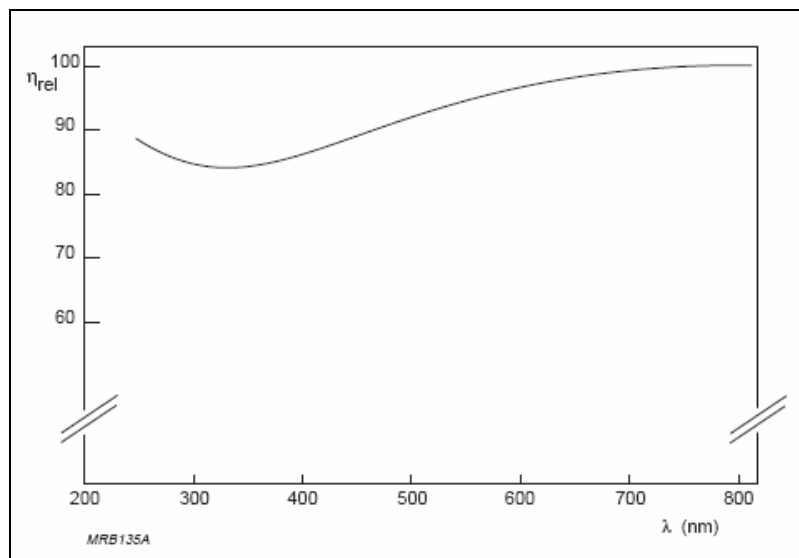
Οι καμπύλες της κβαντικής απόδοσης του Σχήματος 3.3 παρουσιάζουν την εξάρτηση της από το μήκος κύματος για διάφορους τύπους φωτοκαθόδων.

Για φως που δεν είναι μονοχρωματικό, ο λόγος του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται προς τον αριθμό των συνολικών προσπίπτοντων φωτονίων (στην περιοχή επικάλυψης του φάσματος του προσπίπτοντος φωτός με την φασματική ευαισθησία της φωτοκαθόδου) λέγεται ολοκληρωμένη κβαντική απόδοση.

Απόδοση συλλογής συστήματος εισόδου η

Ορίζεται ως ο λόγος (συνήθως επί τοις εκατό %) του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων που φτάνουν στην πρώτη δύνοδο προς τον αντίστοιχο αριθμό που φεύγουν από τη φωτοκάθοδο. Είναι συνάρτηση των αρχικών ταχυτήτων των ηλεκτρονίων και συνεπώς εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός. Δηλαδή ελαττώνοντας το μήκος κύματος, οι ενέργειες των φωτονίων αυξάνονται και η απόδοση συλλογής του συστήματος εισόδου μειώνεται (Σχήμα 3.15). Μια μικρή αύξηση της απόδοσης παρατηρείται σε μήκη κύματος μικρότερα από 200nm για την οποία δεν υπάρχει ικανοποιητική εξήγηση. Όπως η ευαισθησία της φωτοκαθόδου, η απόδοση συλλογής δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια της φωτοκαθόδου. Επίσης εξαρτάται από την γεωμετρία του συστήματος εισόδου. Η ανομοιογένεια είναι συνάρτηση του μήκους κύματος και είναι μια μετρήσιμη ποσότητα. Γενικά δεν υπάρχουν καθολικά αποδεκτές μέθοδοι για την μέτρηση της απόλυτης απόδοσης συλλογής και είναι συχνά πιο χρήσιμο να μιλάμε για σχετική απόδοση συλλογής (σχετική με μια καλά καθορισμένη κατάσταση όπως η μέτρηση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας).

Επίσης η απόδοση συλλογής εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ καθόδου και πρώτης δυνόδου. Κάτω υπό ιδανικές συνθήκες είναι πιθανή η επίτευξη μέσης (σε ολόκληρη την επιφάνεια της φωτοκαθόδου) απόδοσης συλλογής πάνω από 80% για μήκη κύματος μικρότερα από 400nm.



Σχήμα 3.11: Εξάρτηση της σχετικής απόδοσης συλλογής ενός συστήματος εισόδου από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός.

Ενίσχυση G

Η ενίσχυση ενός φωτοπολλαπλασιαστή είναι ο λόγος I_a/I_k , όπου I_a είναι το ανοδικό ρεύμα που παράγεται για καθοδικό ρεύμα I_k . Δηλαδή:

$$G = \frac{I_a}{I_k} \tag{3.12}$$

Για έναν φωτοπολλαπλασιαστή N επιπέδων του οποίου η είναι η απόδοση συλλογής της πρώτης δυνόδου, δ_i ο συντελεστής εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων της i δυνόδου και η_i η απόδοση συλλογής του αντίστοιχου επίπεδου, έχουμε:

$$G = \eta(\delta_1\eta_1)(\delta_2\eta_2)\dots(\delta_N\eta_N) = \eta \prod_{i=1}^N \delta_i\eta_i = \eta \prod_{i=1}^N g_i \tag{3.13}$$

όπου g_i είναι η ενίσχυση του i σταδίου.

Η ενίσχυση αυξάνει ραγδαία με την αύξηση της εφαρμοσμένης τάσης. Αν η απόδοση συλλογής όλων των επιπέδων είναι 100% τότε με βάση τα παραπάνω έχουμε:

$$G = \prod_{i=1}^N k_i V_i^a \tag{3.14}$$

όπου k_i είναι μια σταθερά αναλογίας, V_i η διαδυνωδική τάση ανά επίπεδο και a είναι σταθερά μεταξύ 0.6 και 0.8. Αφού V_i είναι ένα τμήμα k_i' της εφαρμοσμένης τάσης V_{th} ισχύει:

$$G = \prod_{i=1}^N k_i (k_i')^a V_{th}^a = K V_{th}^{Na} \tag{3.15}$$

όπου K σταθερά η οποία εξαρτάται από το υλικό των δυνόδων και την διαίρεση τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ τους. Ενδεικτικά, για έναν φωτοπολλαπλασιαστή 10 επιπέδων η ενίσχυση είναι ανάλογη με την 7^η δύναμη της εφαρμοσμένης τάσης, με αποτέλεσμα να διπλασιάζει την τιμή της για κάθε 10% αύξηση της εφαρμοσμένης τάσης. Σε σύγχρονους

φωτοπολλαπλασιαστές ενίσχυση της τάξης του 10^6 συχνά επιτυγχάνεται για τάσεις μεταξύ 800V και 1200V.

Ο λόγος M μεταξύ της ενίσχυσης G και της απόδοσης συλλογής η του συστήματος εισόδου:

$$M = \frac{G}{\eta} = \prod_{i=1}^N g_i \quad (3.16)$$

εκφράζει την ενίσχυση μόνο του ηλεκτρικού πολλαπλασιαστή, δηλαδή ισούται με τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στη άνοδο για κάθε ένα ηλεκτρόνιο που προσπίπτει στην πρώτη δύνοδο.

Γενικά, η ενίσχυση μεταβάλλεται κάπως με τη θερμοκρασία, το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός και το μέσο ανοδικό ρεύμα.

Ευαισθησία ανόδου S_a

Είναι ο λόγος του ανοδικού ρεύματος I_a προς την προσπίπτουσα ροή Φ . Όπως και η ευαισθησία φωτοκαθόδου μπορεί να οριστεί η ακτινοβολούμενη και η φωτομετρική ευαισθησία.

Η ακτινοβολούμενη ευαισθησία ανόδου ορίζεται ως:

$$S_a(A/W) = \frac{I_a(A)}{\Phi_e(W)} \quad (3.17)$$

όπου Φ_e είναι η συνολική μετρούμενη ροή ακτινοβολίας κατά μήκος όλου του φάσματος.

Η φασματική ευαισθησία ανόδου ορίζεται ως:

$$S_{a,\lambda}(A/W) = \lim_{d\lambda \rightarrow 0} \frac{dI_a(A)}{d\Phi_e(W)} \quad (3.18)$$

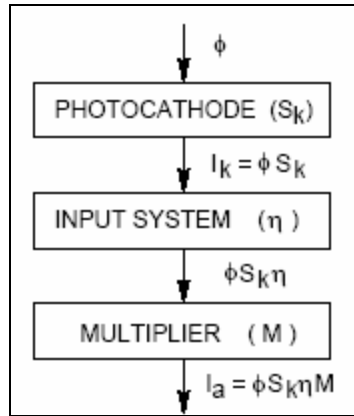
όπου $d\Phi_e$ η μεταβολή της ροής για μεταβολή μήκους κύματος $d\lambda$.

Η ανοδική ευαισθησία φωτεινότητας (όπως στο μπλε ή στο κόκκινο) ορίζεται ως:

$$S_a(A/lm) = \frac{I_a(A)}{\Phi_v(lm)} \quad (3.19)$$

όπου Φ_v είναι η μετρούμενη ροή φωτεινότητας στο κατάλληλο τμήμα του φάσματος. Στα εγχειρίδια η ανοδική μπλε ευαισθησία εκφράζεται σε A/lmF (το F υποδηλώνει το φίλτράρισμα).

Η ανοδική ευαισθησία μπορεί επίσης να εκφραστεί σε σχέση με την ευαισθησία φωτοκαθόδου, την απόδοση συλλογής του συστήματος εισόδου και της ενίσχυσης του πολλαπλασιαστή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12:



Σχήμα 3.12: Χαρακτηριστική ευαισθησία φωτοπολλαπλασιαστή.

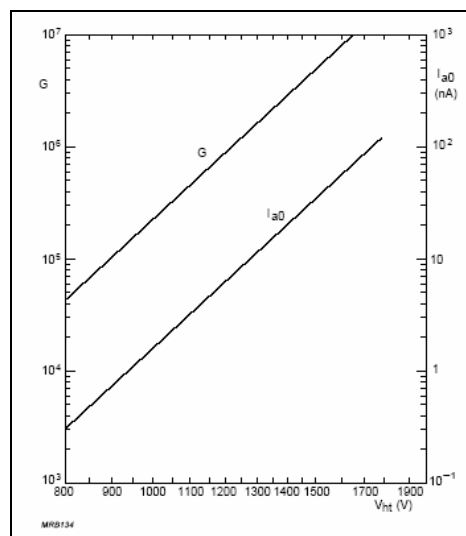
Επίσης ισχύει ότι:

$$S_a = \frac{I_a}{\Phi} = S_k \eta M = G S_k \quad (3.20)$$

Η τιμή της ευαισθησίας ανόδου δεν είναι απαραίτητα ίση με την αντίστοιχη τιμή της ευαισθησίας καθόδου. Οι διαφορές τους κυρίως οφείλονται στις μεταβολές του η για τις διαφορετικές τιμές του μήκους κύματος (κυρίως στο υπεριώδες).

3.5 Ρεύμα σκότους

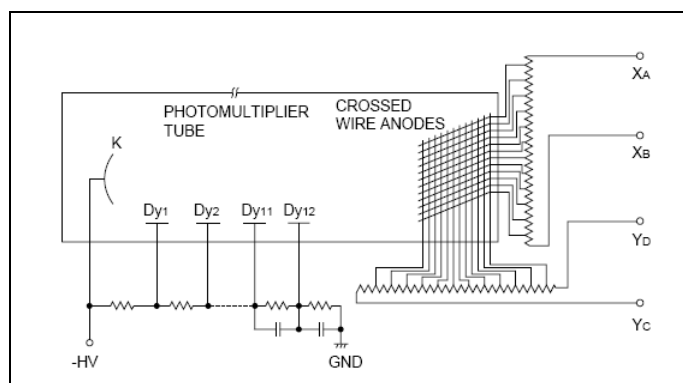
Ακόμα και σε συνθήκες απόλυτου σκότους μια ποσότητα ρεύματος μπορεί να μετρηθεί στην άνοδο ενός φωτοπολλαπλασιαστή. Το ρεύμα αυτό οφείλεται στη θερμιονική εκπομπή, στα φαινόμενα πεδίου και στα ρεύματα διαρροής. Εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση της φωτοκαθόδου και για τις συνηθισμένες τιμές τάσης λειτουργίας είναι ανάλογο της ενίσχυσης (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Παράδειγμα μεταβολής της ενίσχυσης και του ρεύματος σκότους ενός φωτοπολλαπλασιαστή με την μεταβολή της εφαρμοσμένης τάσης.

3.6 Χωρικά ευαίσθητος φωτοπολλαπλασιαστής

Ο χωρικά ευαίσθητος πολλαπλασιαστής (Position Sensitive PhotoMultiplier Tube - PSPMT) της HAMAMATSU (Model R2486) [HAM98] (Σχήμα 3.14) στον οποίο βασίζεται το σύστημα γ-Κάμερα του εργαστηρίου, έχει μια διαλκαλική φωτοκάθοδο 12 δυνόδων και ανοδικό πλέγμα αποτελούμενο από 16 καλώδια σε κάθε κατεύθυνση. Εφαρμόζοντας την τεχνική διαίρεσης φορτίου (η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο) έχουμε την παραγωγή 2 σημάτων σε κάθε άξονα (X_A , X_B , Y_C , Y_D) και χρησιμοποιώντας κατάλληλο αλγόριθμο είναι δυνατός ο υπολογισμός όχι μόνο της ενέργειας του ανιχνευόμενου σωματιδίου αλλά και της θέσης πρόσπτωσης του στον κρύσταλλο-σπινθηριστή.



Σχήμα 3.14: Ο χωρικά ευαίσθητος φωτοπολλαπλασιαστής PSPMT της HAMAMATSU (model R2486) που χρησιμοποιείται στο σύστημα της γ-Κάμερα.

GENERAL			
Parameter		Description/Value	Unit
Spectral Response		300 to 600	nm
Wavelength of Maximum Response		420	nm
Photocathode Material		Bialkali	—
Window	Material	Borosilicate glass	—
	Shape	Plano-plano	mm
	Thickness	3.2 ± 0.3	—
	Index of Refraction at 420nm	1.500 ± 0.001	—
Dynode	Structure	Coarse mesh	—
	Number of Stages	12	—
Anode Number of Wires		16 (X) + 16 (Y)	—
Effective Area		φ 50	mm

MAXIMUM RATINGS (Absolute Maximum Values)			
Parameter		Value	Unit
Supply Voltage		1300	Vdc
Between Anode and Cathode			
Average Anode Current ^(A)		0.1	mA
Ambient Temperature		-80 to +50	°C

CHARACTERISTICS (Typ. at 25°C)			
Parameter		Value	Unit
Cathode Sensitivity	Luminous ^(B)	80	μA/lm
	Radiant at 420nm	77	mA/W
	Blue ^(C)	9.0	μA/lm-b
	Quantum Efficiency at 390nm (peak)	23	%
Anode Sensitivity ^(D)	Luminous	8.0	A/lm
	Radiant at 420nm	7.7 × 10 ³	A/W
Gain ^(D)		1.0 × 10 ⁵	—
Anode Dark Current ^(E)		20	nA
Time Response ^(D)	Rise Time ^(F)	5.5	ns
	Electron Transit Time ^(G)	17	ns

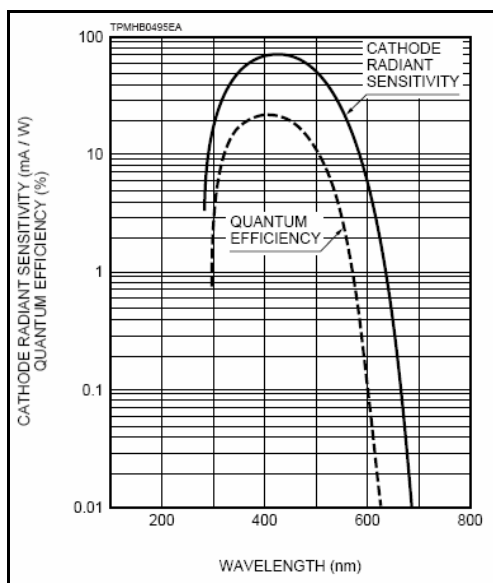
Πίνακας 3.4: Βασικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά του R2486 PSPMT της HAMAMATSU.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται βασικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά του μοντέλου R2486 PSPMT της HAMAMATSU. Όσον αφορά το παράθυρο του, πάχους 3.2mm, είναι κατασκευασμένο από βορικό άλας (δείκτη διάθλασης $n=1.500$, πυκνότητας $\rho=2.23\text{g/cm}^3$ και μέσης ενέργειας excitation $E=134.0\text{eV}$), η σύσταση και η κατά βάρος περιεκτικότητα του οποίου φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

Στοιχείο	A	κ.β.(%)
B	5	4.0064
O	8	53.9562
Na	11	2.8191
Al	13	1.1644
Si	14	37.7220
K	19	0.3321

Πίνακας 3.2: Σύσταση του βορικού άλατος και κατά βάρος (%) περιεκτικότητα.

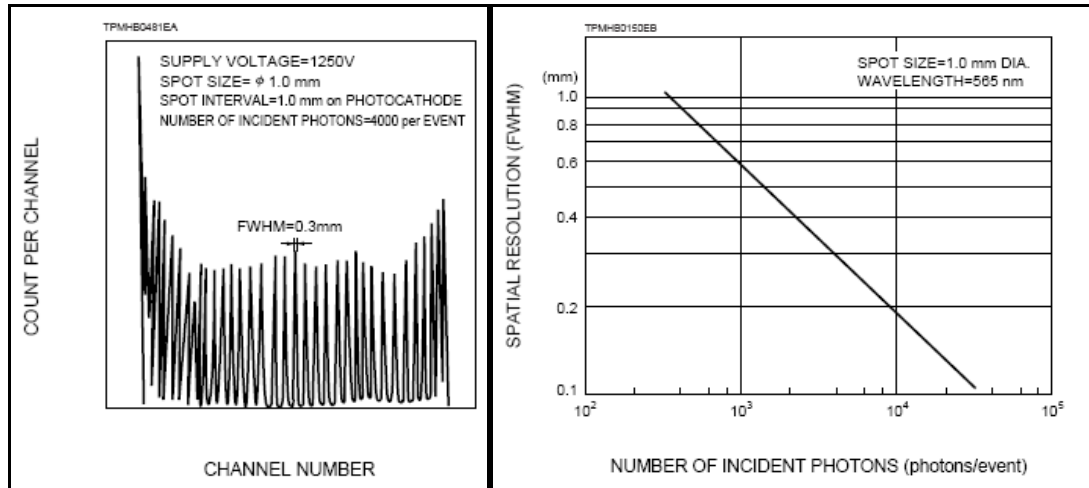
Στο Σχήμα 3.15 βλέπουμε το διάγραμμα της φασματικής απόκρισης του R2486 PSPMT. Το μέγιστο της κβαντικής απόδοσης του παρουσιάζεται στα 390nm και σχεδόν ταυτίζεται (με απόκλιση περίπου 7%) με το μέγιστο της ευαισθησίας της καθόδου (~420nm). Η σύμπτωση των δύο αυτών τιμών είναι επιδιώκεται για την βέλτιστη λειτουργία ενός φωτοπολλαπλασιαστή.



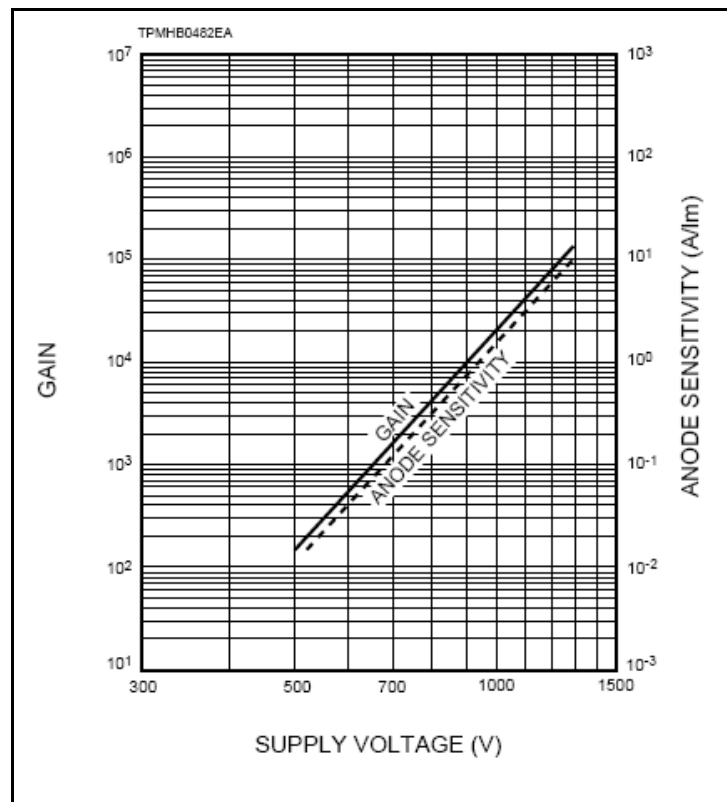
Σχήμα 3.15: Διάγραμμα της φασματικής απόκρισης του R2486 PSPMT της HAMAMATSU.

Στην συνέχεια φαίνονται τα αποτελέσματα της χωρικής διακριτικής ικανότητας όπως τα δίνει ο κατασκευαστής και τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 3.16 [HAM98]. Παρατηρείται ότι τα όρια της χωρικής διακριτικής ικανότητας του R2486 PSPMT είναι τα 0.3mm (FWHM) και η εξάρτηση της από τον αριθμό των προσπιπτόντων φωτονίων είναι αντίστροφα εκθετική, συνεπώς η τιμή της πέφτει (δηλαδή η διακριτική ικανότητα του συστήματος βελτιώνεται) εκθετικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των προσπιπτόντων φωτονίων. Ένα

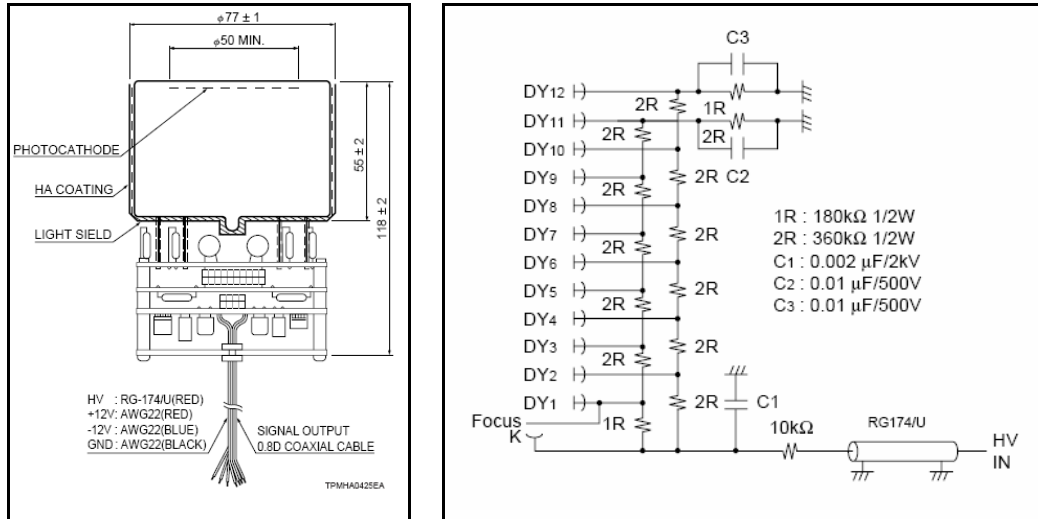
τελευταίο χαρακτηριστικό του PSPMT που δίνεται από τον κατασκευαστή είναι η εξάρτηση της ενίσχυσης του από την υψηλή τάση που χρησιμοποιείται. Η εξάρτηση αυτή είναι διπλά λογαριθμική και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.17. Για τυπικές τιμές της υψηλής τάσης (1000V-1300V) η ενίσχυση κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $10^4 - 10^5$.



Σχήμα 3.16: Μετρήσεις της χωρικής διακριτικής ικανότητας του R2486 PSPMT της HAMAMATSU σε συνάρτηση με την θέση ενός LED οπτικού φωτός (αριστερά) και σε συνάρτηση με τον αριθμό των προσπιπτόντων οπτικών φωτονίων (δεξιά).

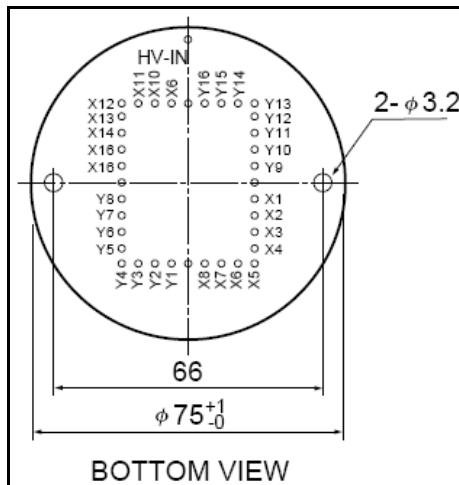


Σχήμα 3.17: Γραφική παράσταση της ενίσχυσης του R2486 PSPMT της HAMAMATSU σε συνάρτηση με την μεταβολή της υψηλής τάσης.



Σχήμα 3.18: Αριστερά: Σχεδιάγραμμα του R2486 PSPMT της HAMAMATSU. Δεξιά: Ηλεκτρονικό κύκλωμα των 12 δυνόδων στο εσωτερικό του PSPMT.

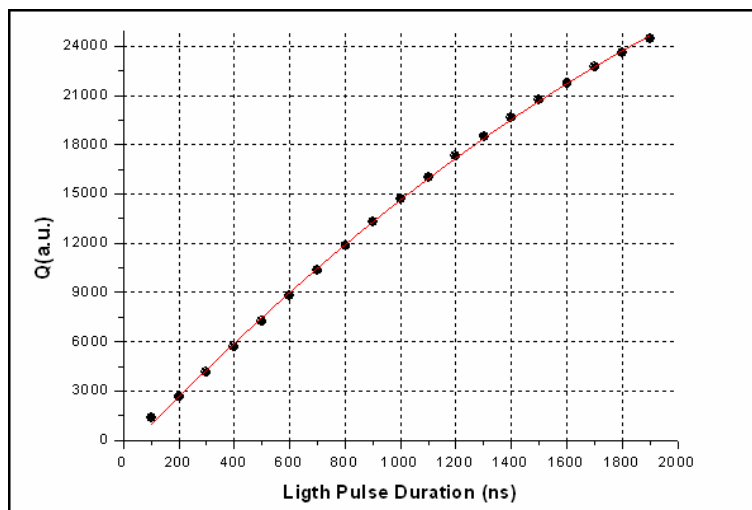
Στο Σχήμα 3.18 (αριστερά) φαίνεται το σχεδιάγραμμα του R2486 PSPMT της HAMAMATSU (με το επίπεδο της εφαρμογής της διαίρεσης φορτίου και την προενίσχυση) ενώ δεξιά του Σχήματος 3.18 φαίνεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα των 12 δυνόδων στο εσωτερικό του φωτοπολλαπλασιαστή. Τέλος, η θέση των 16 καλωδίων όπως αυτά όπως αυτά εξέρχονται από τη βάση του PSPMT φαίνονται στο Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Η θέση των 16 καλωδίων όπως αυτά όπως αυτά εξέρχονται στη βάση του PSMT.

Η χωρική διακριτική ικανότητα του φωτοπολλαπλασιαστή ελέγχθηκε επίσης πειραματικά πριν την ενσωμάτωση του κρυστάλλου-σπινθηριστή μέσα στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Σκοπός του ελέγχου αυτού ήταν ο ακριβής προσδιορισμός της εσωτερικής απόδοσης της λυχνίας στον προσδιορισμό κυρίως της θέσης, παράλληλα με την γραμμικότητα του συλλεγόμενου φορτίου. Αυτό έγινε χρησιμοποιώντας LED οπτικού φωτός το οποίο τοποθετήσαμε στο κέντρο του οπτικού πεδίου του PSPMT. Ο φωτεινός παλμός που οδηγείται στο LED παράγεται από μια γεννήτρια παλμών της Agilent (model: 33220A) [AGI03].

Αυξάνοντας τη χρονική διάρκεια του παλμού (Light Pulse Duration ή LPD) ελέγχθηκε η γραμμικότητα του PSPMT ως προς το συλλεγόμενο φορτίο. Για το λόγο αυτό καταγράφηκε, εφαρμόζοντας υψηλή τάση H.V.=900V, η μέση τιμή του μετρούμενου φορτίου για διάρκειες παλμών από 100ns έως 1900ns με βήμα μέτρησης τα 100ns. Τα αποτελέσματα φαίνονται στη γραφική παράσταση του Σχήματος 3.20 όπου το συλλεγόμενο φορτίο Q προκύπτει από το άθροισμα των τεσσάρων καταγραφόμενων σημάτων (X_A , X_B , Y_C , Y_D) και μετριέται σε μονάδες του συστήματος ψηφιοποίησης της γ -Κάμερα.



Σχήμα 3.20: Γραφική παράσταση του συλλεγόμενου φορτίου Q με τη χρονική διάρκεια παλμού LPD του LED όταν αυτό είναι τοποθετημένο στο κέντρο του οπτικού πεδίου του PSPMT, εφαρμόζοντας υψηλή τάση H.V.=900V. Το φορτίο προκύπτει από το άθροισμα των 4 καταγραφόμενων σημάτων (X_A , X_B , Y_C , Y_D) και μετριέται σε μονάδες του συστήματος ψηφιοποίησης της γ -Κάμερα. Με κόκκινο χρώμα είναι η καμπύλη που προκύπτει από προσέγγιση πολυωνυμικής συνάρτησης 2^{ου} βαθμού.

Προσεγγίζοντας τα δεδομένα του Σχήματος 3.20 από πολυωνυμική συνάρτηση 2^{ου} βαθμού $y = Ax^2 + Bx + C$ (όπου η μεταβλητή y αντιστοιχεί στο συλλεγόμενο φορτίο Q ενώ η μεταβλητή x στην χρονική διάρκεια του παλμού LPD) προκύπτουν οι παρακάτω τιμές των συντελεστών A, B και C:

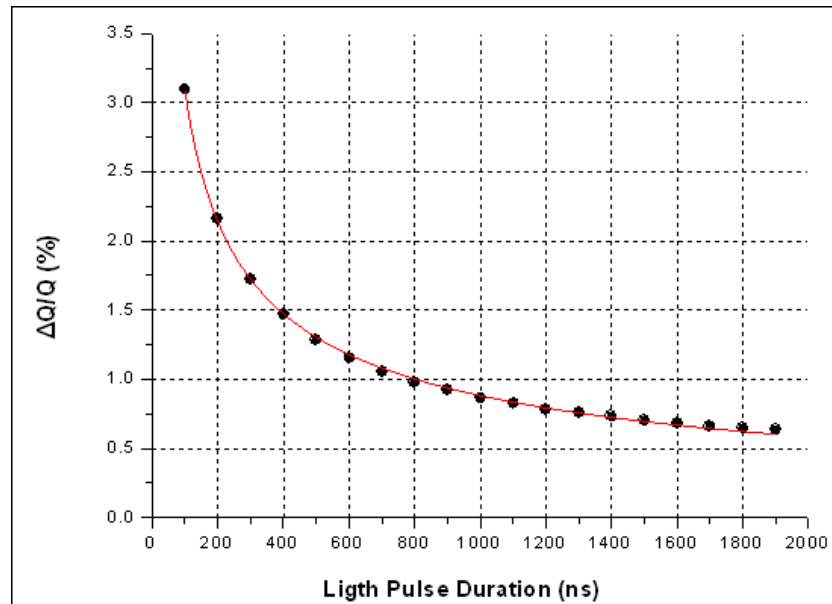
$$A = -0.00228 \pm 0.00015$$

$$B = 17.76 \pm 0.31$$

$$C = -830 \pm 130$$

Για τετραγωνικό παλμό φωτός, παραγόμενο με σταθερή τάση LED, η διάρκεια παλμού αποτελεί μια άλλη έκφραση του συνολικού αριθμού των εκπεμπόμενων οπτικών φωτονίων. Η μικρή τιμή του συντελεστή A υποδηλώνει τη μικρή απόκλιση από τη γραμμικότητα του Q σε σχέση με το LPD η οποία εμφανίζεται κυρίως για ακραίες τιμές του LPD ενώ για κεντρικές περιοχές τιμών παρατηρείται γραμμική εξάρτηση. Η μεταβολή στην χρονική διάρκεια του παλμού του LED αντιστοιχεί σε ανιχνευόμενα γ -φωτόνια διαφορετικής ενέργειας. Άρα η γραμμικότητα που παρατηρήθηκε προηγουμένως μεταξύ συλλεγόμενου

φορτίου και χρονικής διάρκειας του παλμού αντιστοιχεί σε γραμμική απόδοση του PSPMT στην καταγραφή γ-φωτονίων διαφορετικής ενέργειας. Η γραμμικότητα αυτή είναι απαραίτητη για την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος της γ-Κάμερα. Παράλληλα προσδιορίζουμε το επί τοις εκατό σφάλμα $\Delta Q/Q$ του συλλεγόμενου φορτίου Q το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.21 σε συνάρτηση με τη χρονική διάρκεια του παλμού. Το μέγεθος ΔQ ισούται αριθμητικά με το εύρος σ της γκαουσιανής κατανομής του συλλεγόμενου φορτίου Q .



Σχήμα 3.21: Γραφική παράσταση του σφάλματος $\Delta Q/Q$ (%) του συλλεγόμενου φορτίου Q με τη χρονική διάρκεια παλμού LPD του LED όταν αυτό είναι τοποθετημένο στο κέντρο του οπτικού πεδίου του PSPMT, εφαρμόζοντας υψηλή τάση H.V.=900V. Το μέγεθος ΔQ είναι το εύρος σ της γκαουσιανής κατανομής του φορτίου Q όπου το φορτίο Q προκύπτει από το άθροισμα των τεσσάρων καταγραφόμενων σημάτων (X_A , X_B , Y_C , Y_D). Με κόκκινο χρώμα είναι η καμπύλη που προκύπτει από προσέγγιση των δεδομένων από κατάλληλη συνάρτηση.

Προσεγγίζοντας τα δεδομένα του Σχήματος 3.21 με συνάρτηση της μορφής $y = A + \frac{B}{\sqrt{x}}$

(όπου η μεταβλητή y αντιστοιχεί στο (%) σφάλμα $\Delta Q/Q$ ενώ η μεταβλητή x στην χρονική διάρκεια του παλμού) προκύπτουν οι παρακάτω τιμές των συντελεστών A και B :

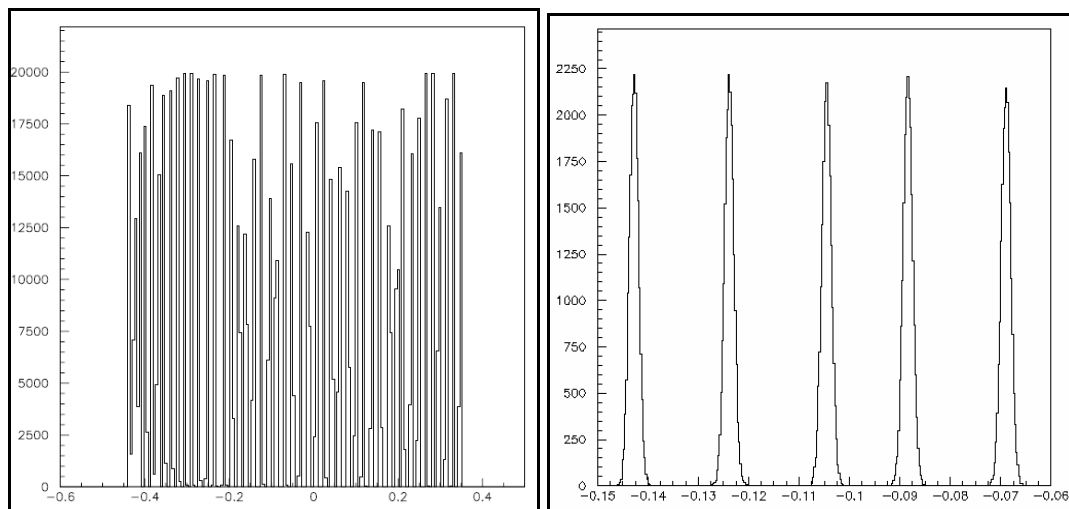
$$A = -0.1367 \pm 0.0090$$

$$B = 32.22 \pm 0.21$$

Παρατηρούμε, όπως αναφέρεται στη θεωρία φωτοπολλαπλασιαστών, ότι το σφάλμα μέτρησης της ενέργειας E (άρα και του μετρούμενου φορτίου Q) είναι αντιστρόφως ανάλογο της \sqrt{E} (άρα και της χρονικής διάρκειας του εισερχόμενου παλμού αφού οι διάφορες τιμές του αντιστοιχούν σε γ-φωτόνια διαφορετικής ενέργειας). Επιπλέον, παρατηρείται ότι για συνήθεις συνθήκες μέτρησης το σφάλμα αυτό είναι της τάξης του 1%.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η χωρική διακριτική ικανότητα και η γραμμικότητα του PSPMT μεταξύ της ανακατασκευασμένης και της πραγματικής θέσης του LED. Για το σκοπό αυτό καταγράφηκαν δεδομένα μετακινώντας το LED κατά μήκος του x -άξονα του PSPMT με

βήμα 1mm. Στο Σχήμα 3.22 φαίνονται οι προβολές των σημείων στον x-άξονα. Στο αριστερό γράφημα απεικονίζονται όλα τα σημεία ενώ στο δεξί έχει γίνει μεγέθυνση μιας περιοχής 5 σημείων.



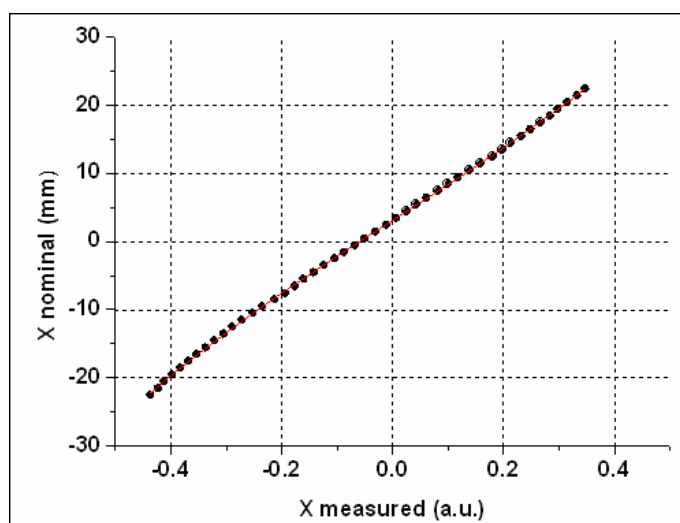
Σχήμα 3.22: Αριστερά: Προβολές ισαπεχόντων σημείων, κατά μήκος του x άξονα, με βήμα μετακίνησης του LED 1mm. Δεξιά: Μεγέθυνση μιας περιοχής 5 σημείων από το αριστερό γράφημα.

Κάνοντας fit στα δεδομένα, με σκοπό τον υπολογισμό της χωρικής διακριτικής ικανότητας του συστήματος, υπολογίσαμε ότι:

$$\langle \sigma \rangle = (0.052 \pm 0.003)mm \text{ ή } \langle FWHM \rangle = (0.122 \pm 0.007)mm$$

δηλαδή αυτό είναι το κάτω όριο του PSPMT, άρα και του συστήματος μας και δεν μπορούμε να φτάσουμε σε καλύτερη χωρική διακριτική ικανότητα από αυτή.

Επιπλέον, καταγράφοντας την ανακατασκευασμένη θέση του LED (X_{measured}) και την αντίστοιχη ονομαστική του θέση (X_{nominal}) ελέγχουμε τη γραμμικότητα στην απεικόνιση της θέσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην γραφική παράσταση του Σχήματος 3.23.



Σχήμα 3.23: Γραφική παράσταση της μετρούμενης (ανακατασκευαζόμενης) θέσης X_{measured} (σε μονάδες του συστήματος ψηφιοποίησης) με την ονομαστική θέση X_{nominal} (σε mm). Με κόκκινο χρώμα είναι η καμπύλη που προκύπτει από προσέγγιση των δεδομένων με πολυωνμική συνάρτηση 3^{ου} βαθμού.

Προσεγγίζοντας τα δεδομένα του Σχήματος 16 με πολυωνμική συνάρτηση 3^{ου} βαθμού $y = f(x) = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$ (όπου η μεταβλητή x αντιστοιχεί στη μετρούμενη θέση X_{measured} και η μεταβλητή y στην ονομαστική της θέση X_{nominal}) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$A = 30.0 \pm 2.1$$

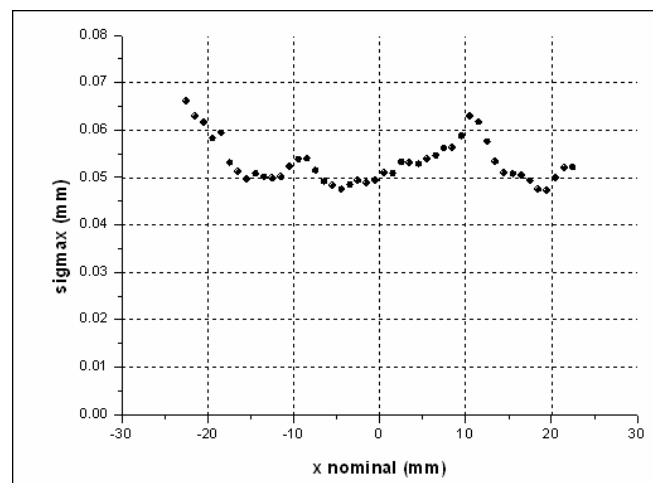
$$B = -0.27 \pm 0.53$$

$$C = 52.19 \pm 0.22$$

$$D = 3.135 \pm 0.034$$

Παρατηρούμε ότι, για μικρές τιμές του x , οι συντελεστές A και B δεν συμβάλλουν σημαντικά στον προσδιορισμό της ονομαστικής θέσης X_{nominal} με αποτέλεσμα την (σχεδόν) γραμμική συμπεριφορά του PSPMT στην απεικόνιση της θέσης. Μόνο στις ακραίες θέσεις του οπτικού του πεδίου έχουμε μικρή απόκλιση από τη γραμμικότητα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση και των μικρών διορθωτικών παραγόντων 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού (συντελεστές A και B).

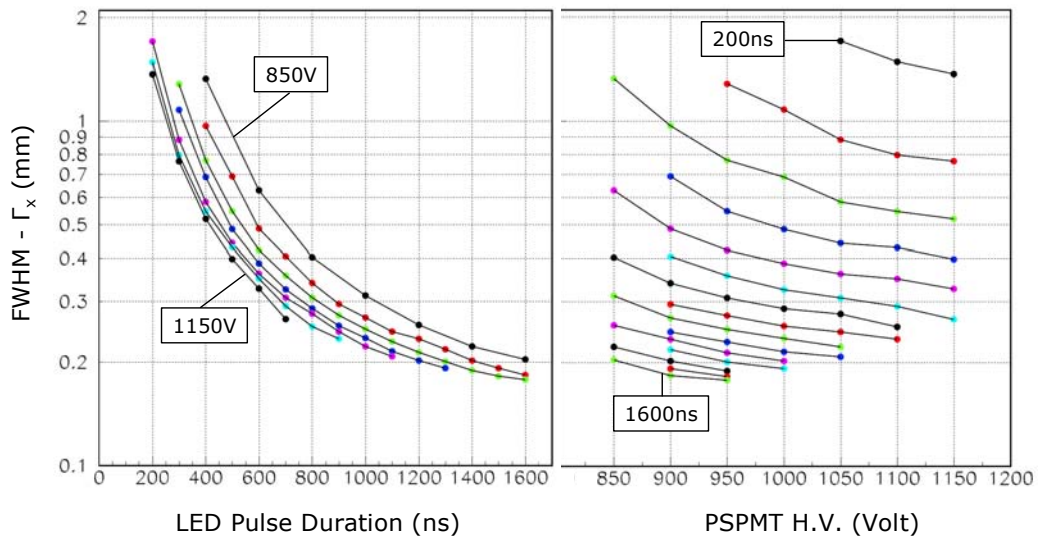
Στη συνέχεια κάνουμε γραφική παράσταση εύρους σ_x (Σχήμα 3.24) της ανακατασκευαζόμενης θέσης X_{measured} σε σχέση με την ονομαστική θέση X_{nominal} . Οι μονάδες του εύρους σ_x αν και αρχικά εκφράζονται σε μονάδες του συστήματος ψηφιοποίησης μετατρέπονται σε mm με τη βοήθεια του τύπου $\sigma_x (\text{mm}) = f'(X_{\text{measured}}) \cdot \sigma_x$, όπου f είναι η πολυωνμική συνάρτηση 3^{ου} βαθμού που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 3.24: Γραφική παράσταση του εύρους σ_x της ανακατασκευαζόμενης θέσης X_{measured} σε σχέση με την ονομαστική θέση X_{nominal} .

Η διακύμανση του εύρους σ_x μεταξύ των τιμών 0.05mm και 0.06mm που παρατηρείται από τα δεδομένα του Σχήματος 3.24 είναι τιμή πολύ ικανοποιητική η οποία δηλώνει και τα όρια του συστήματος στο σφάλμα μέτρησης της θέσης.

Τέλος στο Σχήμα 3.25 βλέπουμε την εξάρτηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας του PSPMT από την διάρκεια παλμών του LED για διάφορες τιμές της υψηλής τάσης και από την υψηλή τάση για διάφορες τιμές της διάρκειας παλμών του LED [POL06].



Σχήμα 3.25: Εξάρτηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας του PSPMT από την διάρκεια παλμών του LED (αριστερά) και από την υψηλή τάση του PSPMT (δεξιά).

Συνοψίζοντας ως το σημείο αυτό, έχουν αναφερθεί οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά όλων των επιμέρους τμημάτων που αποτελούν το σύστημα της γ -Κάμερα και στη συνέχεια μπορεί να γίνει αναφορά στον τρόπο της σύνδεσης τους με σκοπό την ανάπτυξη ενός λειτουργικού συστήματος.

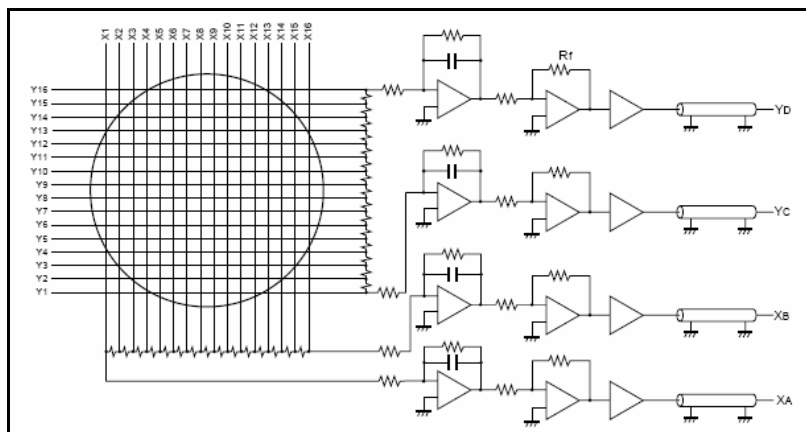
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σύνθεση της γ -Κάμερα

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η σύνθεση των επιμέρους τμημάτων με απώτερο σκοπό την κατασκευή ενός λειτουργικού συστήματος γ -Κάμερα με ανταγωνιστικές προδιαγραφές τόσο στην χωρική διακριτική ικανότητα όσο και στην ευαισθησία. Δηλαδή θα γίνει αναφορά στην εφαρμογή της τεχνικής διαίρεσης φορτίου μέσω συστοιχίας αντιστάσεων για την παραγωγή των εξερχόμενων ηλεκτρικών σημάτων, στον τρόπο ανάγνωσης και καταγραφής τους και στην επεξεργασία τους για την ανακατασκευή της θέσης και της ενέργειας των αντίστοιχων προσπίπτοντων φωτονίων στον κρύσταλλο-σπινθηριστή. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού θα δοθεί μια πρώτη εκτίμηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας του ολοκληρωμένου συστήματος σε προβολικό επίπεδο.

4.1 Τεχνική διαίρεσης φορτίου

Ο χωρικά ευαίσθητος πολλαπλασιαστής HAMAMATSU R-2486, όπως έχει αναφερθεί, έχει ανοδικό πλέγμα αποτελούμενο από καλώδια, ορθογώνια διασταυρωμένα μεταξύ τους, αντί για μια απλή άνοδο. Τα καλώδια αυτά είναι 16 σε κάθε κατεύθυνση τα οποία απέχουν μεταξύ τους 3.75mm. Παρεμβάλλοντας ίσες αντιστάσεις (1k Ω) μεταξύ των καλωδίων αυτών το συνολικό φορτίο που προσπίπτει στο ανοδικό αυτό πλέγμα κατανέμεται αθροιστικά στα άκρα κάθε κατεύθυνσης (Σχήμα 4.1) με αποτέλεσμα την παραγωγή δύο σημάτων σε κάθε άξονα, (X_A , X_B , Y_C , Y_D). Συγκεκριμένα, θα αναφερθεί παρακάτω ότι με την επεξεργασία των σημάτων αυτών μπορεί να υπολογιστεί όχι μόνο η ενέργεια αλλά και η θέση του προσπίπτοντος γ -φωτονίου. Έτσι, χρησιμοποιώντας το ανοδικό πλέγμα αυτού του τύπου μαζί με την τεχνική διαίρεσης φορτίου επιτυγχάνεται υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, ικανοποιητική γραμμικότητα στην απεικόνιση της θέσης και γρήγορη ψηφιοποίηση και καταγραφή των εξερχόμενων σημάτων σε αρχείο με σκοπό την περαιτέρω offline επεξεργασία τους.



Σχήμα 4.1: Το ανοδικό πλέγμα με την τεχνική διαίρεσης φορτίου (συστοιχία αντιστάσεων) και την παραγωγή των 2 σημάτων σε κάθε άξονα με την προενίσχυση τους.

4.2 Ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος

Η ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος βασίζεται στην κάρτα PCI-9812/10 της ADLink [ADL03] (Σχήμα 4.2) η οποία είναι μία σύγχρονη κάρτα ψηφιοποίησης δεδομένων βασισμένη σε 32-bit PCI Bus αρχιτεκτονική, με τέσσερα ανεξάρτητα κανάλια εισόδου. Ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας της PCI-9812/10 είναι 20MSamples/sec, για κάθε κανάλι ξεχωριστά, με υψηλή ταχύτητα ροής στην τοπική μνήμη.



Σχήμα 4.2: Φωτογραφία της κάρτας PCI 9812.

Χαρακτηριστικά

Η PCI-9812/10 κάρτα ψηφιοποίησης δεδομένων είναι σχεδιασμένη με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

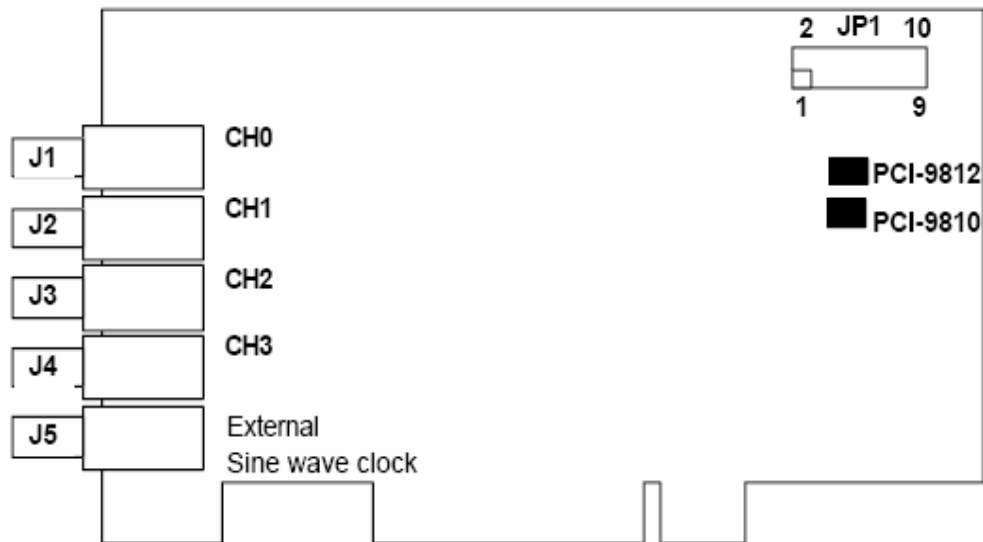
- 32-bit PCI- Bus Mastering DMA μεταφορά δεδομένων.
- 12-bit (9812) αναλογική input (είσοδος) ανάλυση.
- On- board 32 kwords (δείγματα) A/D FIFO μνήμη (First In First Out).
- 20MHz (αναλογικά /ψηφιακά) ρυθμό δειγματοληψίας ανά κανάλι.
- 4 αναλογικές εισοδοι σε μορφή single-ended.
- Διπολικές input (είσοδοι) σημάτων, $\pm 1V$, $\pm 5V$.
- 4 μετατροπείς converters ταυτόχρονης δειγματοληψίας A/D.
- 5 τρόπους σκανδαλισμού (trigger): software trigger, pre- trigger, post-trigger, middle trigger και delay trigger.

Συνδεσμολογία σημάτων

Παρακάτω περιγράφονται η συνδεσμολογία του σήματος μεταξύ της PCI-9812/10 και εξωτερικών συσκευών.

Connectors (συνδέσεις)

Η PCI-9812/10 συνδέεται με εξωτερικές συσκευές μέσω 5 BNC συνδέσεις και ενός 10-pin διπλής γραμμής header. Στο Σχήμα 4.3 μπορούμε να δούμε την τοπολογία αυτών των συνδέσεων.



Σχήμα 4.3: Η θέση των συνδέσεων.

όπου:

J1: Η J1 BNC σύνδεση χρησιμοποιείται για το σήμα input (εισόδου) του καναλιού 0 του A/D μετατροπέα (στην περίπτωση μας οδηγείται το σήμα X_A).

J2: Η J2 BNC σύνδεση χρησιμοποιείται για το σήμα input (εισόδου) του καναλιού 1 του A/D μετατροπέα (στην περίπτωση μας οδηγείται το σήμα X_B).

J3: Η J3 BNC σύνδεση χρησιμοποιείται για το σήμα input (εισόδου) του καναλιού 2 του A/D μετατροπέα (στην περίπτωση μας οδηγείται το σήμα Y_C).

J4: Η J4 BNC σύνδεση χρησιμοποιείται για το σήμα input (εισόδου) του καναλιού 3 του A/D μετατροπέα (στην περίπτωση μας οδηγείται το σήμα Y_D).

J5: Η J5 BNC σύνδεση χρησιμοποιείται για το σήμα input (εισόδου) του εξωτερικού ρολογιού 0.

JP1: Η σύνδεση των 10-pin (Πίνακας 4.1) χρησιμοποιείται για το ψηφιακό σήμα input (εισόδου), συμπεριλαμβανομένου ενός ψηφιακού ρολογιού, μιας ψηφιακής σκανδάλης και τριών ψηφιακών inputs (εισόδων).

Pin	Signal	Pin	Signal
1	External Clock Input 1	6	Ground
2	Ground	7	Digital Input 0
3	External Digital Trigger Input	8	Ground
4	Ground	9	Digital Input 0
5	Digital Input 0	10	Ground

Πίνακας 4.1: Η σύνδεση των 10-pin της JP1.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η κάρτα αυτή μεταφέρει ψηφιοποιημένα δεδομένα στη μνήμη του υπολογιστή (host memory) μέσω ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας PCI Bus (Peripheral Component Interconnect). Το πρωτόκολλο επικοινωνίας PCI Bus επιτρέπει τόσο την άμεση επικοινωνία των PCI μονάδων με τη μνήμη του υπολογιστή, όσο και την έμμεση επικοινωνία τους με τον επεξεργαστή. Η ταχύτητα του PCI Bus είναι 33MHz, ενώ σε κάθε κύκλο εργασίας το εύρος της πληροφορίας που μεταφέρεται είναι 32bits, δηλαδή 4bytes. Οπότε, συνολικά κάθε δευτερόλεπτο μεταφέρονται:

$$4 \text{ bytes} \times 33 \text{ MHz} = 132 \text{ MBps}$$

Στον ακόλουθο Πίνακα 4.2 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κάρτας PCI 9812 :

Αναλογικές εισόδους	
Πλήθος	4 εισόδους αναλογικού σήματος + 1 είσοδος ημιτονοειδούς σήματος (external analog clock)
Τάση εισόδου/ Εμπέδηση εισόδου	Διπολικά αναλογικά σήματα ύψους ± 1 ή ± 5 Volt / 50 Ω για ± 1 και ± 5 Volt, 1.25 K Ω για ± 5 Volt, 15 M Ω για ± 1 Volt (η επιλογή γίνεται με κατάλληλη βραχυκύκλωση)
Ψηφιοποίηση	4 flash ADC's, ένας για κάθε αναλογική είσοδο
Ρυθμός δειγματοληψίας	Προγραμματιζόμενη μέσω λογισμικού, μέγιστη τιμή για κάθε ADC : 20 MHz
Διακριτική ικανότητα	12 bit ($2^{12} = 4096$ κανάλια)
Μνήμη	32 K FIFO, DMA data transfer
Τρόποι σκανδαλισμού (triggering)	Software-trigger, Pre-trigger, Post-trigger, Middle-trigger, Delay-trigger
Πηγές σκανδαλισμού	Software (εσωτερική πηγή σκανδαλισμού), External analog trigger, External digital trigger

Ρολόι των ADC' s	Εσωτερικό (του συστήματος), External digital clock, External analog sinewave clock (η 5 ^η αναλογική είσοδος)
Ψηφιακές εισόδους	
Πλήθος	3 ψηφιακές εισόδους γενικής χρήσης + 1 είσοδος για το ρολόι των ADC' s (External digital clock) + 1 είσοδος για τον σκανδαλισμό (External digital trigger) + 5 γειώσεις
Τάση εισόδου / Εμπέδηση εισόδου	Λογικά TTL σήματα / 10 ΚΩ

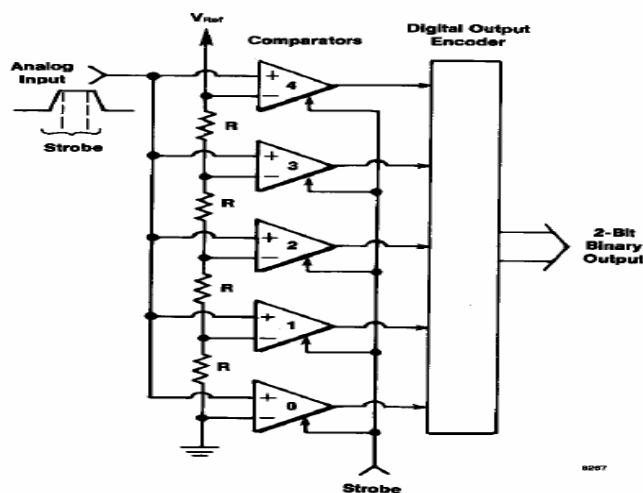
Πίνακας 4.2: Βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της κάρτας PCI 9812.

Από τον χωρικά ευαίσθητο φωτοπολλαπλασιαστή (PSPMT) R2486 φεύγουν τέσσερα αναλογικά σήματα με τα οποία τροφοδοτούμε τις τέσσερις αναλογικές εισόδους της κάρτας PCI (CH0, CH1, CH2, CH3), ώστε να ψηφιοποιηθούν ταυτόχρονα από τέσσερις ADC με μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 20MHz.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3 οι τέσσερις αναλογικές εισόδους αναφέρονται ως CH0, CH1, CH2 και CH3, ενώ η τελευταία αναλογική είσοδος δέχεται ένα ημιτονοειδές σήμα που μπορεί να παίζει το ρόλο του εξωτερικού ρολογιού για τους τέσσερις ADC.

Flash ADC

Το σήμα που δέχεται κάθε αναλογική είσοδο ψηφιοποιείται από έναν ADC (έναν για κάθε μία αναλογική είσοδο). Ο κάθε ADC ακολουθεί την αρχή λειτουργίας ενός flash ADC (Σχήμα 4.4).



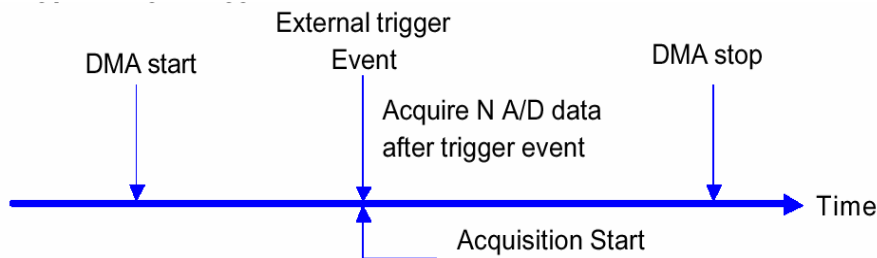
Σχήμα 4.4: Αρχή λειτουργίας ενός flash ADC.

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα ενός flash ADC αποτελείται από τόσους comparators (συγκριτές) τάσης, όσα είναι τα κανάλια του ADC και ένα επιπλέον. Ο κάθε ADC έχει 4096 κανάλια, άρα θα έχουμε 4097 comparators για τον κάθε ADC.

Η ψηφιοποίηση γίνεται κυρίως σε δύο βήματα. Αρχικά, μέσα σε ένα χρονικό παράθυρο, που καθορίζεται από το χρήστη, ανιχνεύεται το μέγιστο ύψος του παλμού εισόδου. Έπειτα, γίνεται διαδοχική σύγκριση του μέγιστου αυτού ύψους με τα κατώφλια τάσης των συγκριτών (comparators).

Χρονικό Παράθυρο Ψηφιοποίησης

Μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος χρονικό παράθυρο, το οποίο εξαρτάται από το ρυθμό δειγματοληψίας (sampling rate) και τον αριθμό των σημείων ψηφιοποίησης του εισερχόμενου αναλογικού παλμού, θα πρέπει ο flash ADC να ψηφιοποιήσει τον αναλογικό παλμό. Η χρονική στιγμή έναρξης της δειγματοληψίας εξαρτάται από το trigger mode, στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα χρησιμοποιήσουμε το post-trigger acquisition (Σχήμα 4.5).

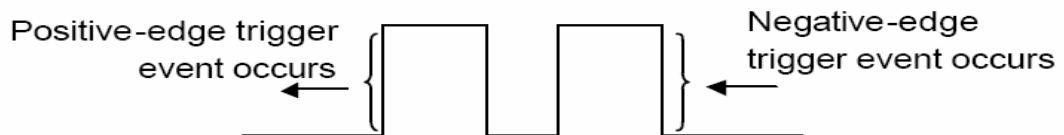


Σχήμα 4.5: Διαδικασία και χρονικό παράθυρο ψηφιοποίησης.

Στο post-trigger acquisition συλλέγουμε δεδομένα μετά από ένα συγκεκριμένο γεγονός trigger. Έστω A ο αριθμός των σημείων ψηφιοποίησης του σήματος και K το sampling rate, τότε το εύρος του χρονικού παραθύρου T θα είναι:

$$T = AxK^{-1}$$

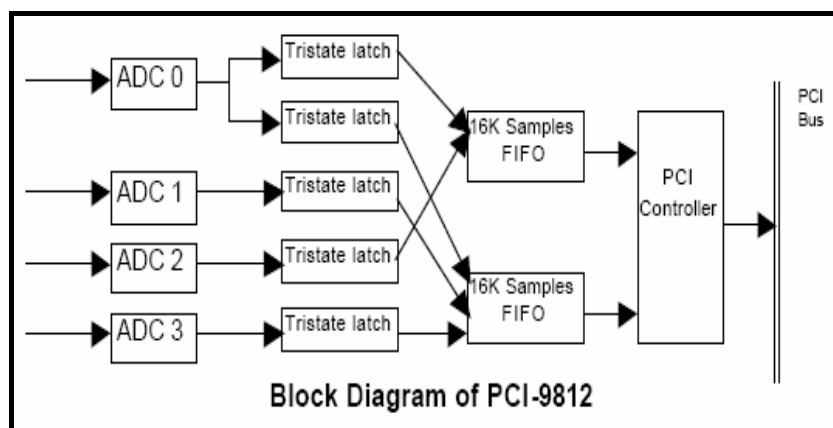
Η PCI 9812 κάρτα δέχεται ως trigger events λογικούς TTL παλμούς (μεταξύ των τιμών 2.5 και 5 Volt). Τα trigger events (external digital trigger) εισάγονται στην υποδοχή JP1. Η ψηφιοποίηση αρχίζει τη χρονική στιγμή που το σήμα συμπέσει με το ανοδικό (rising edge) ή καθοδικό (falling edge) τμήμα του λογικού παλμού (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Χρονική στιγμή της έναρξης της ψηφιοποίησης ενός παλμού.

Μεταφορά δεδομένων αναλογικών- ψηφιακών

Για την απόκτηση των αναλογικών-ψηφιακών (AD) δεδομένων υπάρχουν αρκετές λειτουργίες τις οποίες παρέχει η κάρτα PCI-9812. Το block διάγραμμα της κάρτας PCI-9812 φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Block διάγραμμα της κάρτας PCI-9812.

Ταυτόχρονη δειγματοληψία και των τεσσάρων AD καναλιών

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα η κάρτα PCI-9812/10 είναι εφοδιασμένη με 4 μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (AD), οι οποίοι υποστηρίζουν ταυτόχρονα μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 20 MHz.

Για την εφαρμογή ενός καναλιού, μπορούμε να επιλέξουμε μόνο το κανάλι 0 και το συνολικό μήκος της μνήμης FIFO είναι 32K δειγμάτων. Για ταυτόχρονη εφαρμογή δύο καναλιών πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τα κανάλια 0 και 1 ώστε να έχουμε καλύτερη λειτουργία της μνήμης FIFO. Το κύκλωμα της κάρτας δεν επιτρέπει τη χρήση των καναλιών 0 και 2 ή των καναλιών 2 και 3 την ίδια στιγμή.

Ολική Ροή Δεδομένων

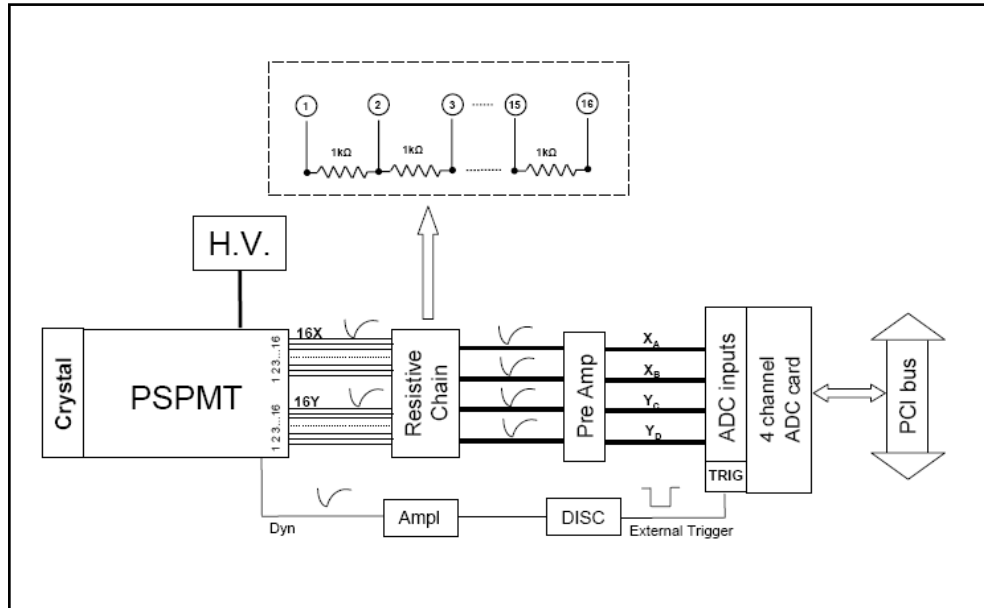
Όταν τα τέσσερα κανάλια ξεκινούν την ίδια στιγμή, τότε το συνολικό ροή δεδομένων από τον AD (αναλογικό σε ψηφιακό) μετατροπέα στην FIFO μνήμη θα είναι:

Ρυθμός δειγματοληψίας x Αριθμό καναλιών x 2 bytes/ κανάλι

Συνεπώς, από την παραπάνω σχέση, προκύπτει για 4 κανάλια και μέγιστου ρυθμού δειγματοληψίας 20MHz, ότι η μέγιστη ροή ψηφιοποίησης δεδομένων είναι ίση με:

$$20\text{MHz} \times 4 \text{ κανάλια} \times 2 \text{ bytes/ κανάλι} = 160\text{MBs}$$

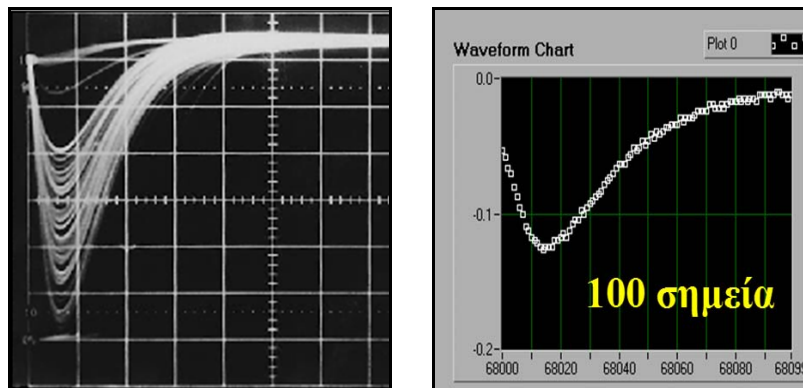
Το διάγραμμα ροής που ακολουθείται για την καταγραφή των δεδομένων φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Σύμφωνα με το διάγραμμα, από τα 16 σήματα που παράγονται σε κάθε άξονα στο ανοδικό πλέγμα του PSPMT, μετά την εφαρμογή του κυκλώματος διαίρεσης φορτίου περιορίζονται στα 4 σήματα (2 σε κάθε άξονα). Στη συνέχεια τα 4 σήματα προενισχύονται και οδηγούνται στις 4 εισόδους του ADC της PCI κάρτας και καταγράφονται ως X_A , X_B , Y_C και Y_D . Ο εξωτερικός trigger που δίνει την έναρξη της καταγραφής δίνεται από το σήμα της τελευταίας δυνόδου ο οποίος ενισχύεται και περνάει από διευκρινιστή με αποτέλεσμα την παραγωγή λογικού τετραγωνικού παλμού. Ο παλμός αυτός εισάγεται στην είσοδο εξωτερικού trigger της PCI κάρτας και η ψηφιοποίηση αρχίζει και διαρκεί προκαθορισμένο χρόνο ο οποίος καθορίζεται από τον χρήστη και συνήθως είναι της τάξης μερικών μs.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροής που ακολουθείται για την καταγραφή των δεδομένων του PSPMT.

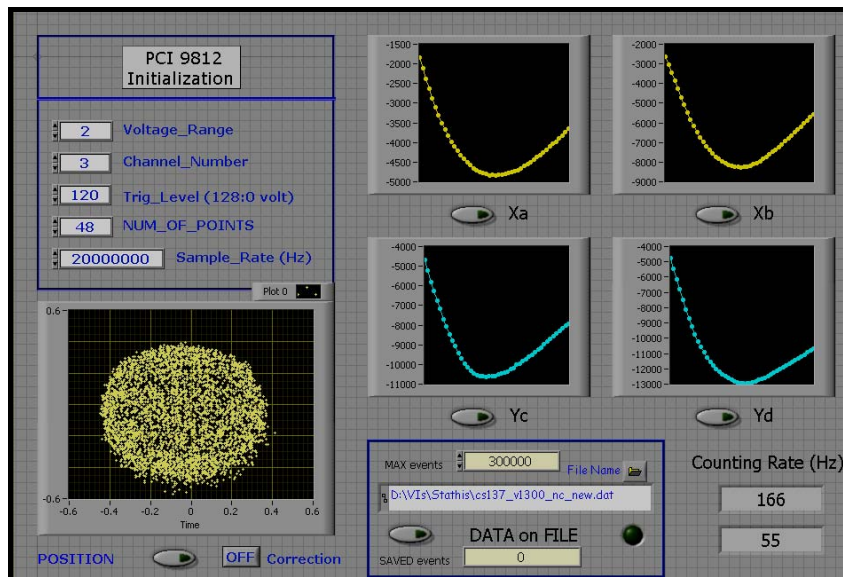
Στο Σχήμα 4.9 βλέπουμε ένα παράδειγμα αναλογικού παλμού, μετά την προενίσχυσή του, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την ψηφιοποίησή του. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η ψηφιοποίηση έγινε με ρυθμό 20Mhz δηλαδή δύο διαδοχικά σημεία του ψηφιοποιημένου σήματος απέχουν 50ns μεταξύ τους. Το χρονικό εύρος ψηφιοποίησης αντιστοιχεί σε:

$$100 \times 50\text{ns} = 5\mu\text{s}$$



Σχήμα 4.9: Παράδειγμα αναλογικού σήματος πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την ψηφιοποίησή του.

Η καταγραφή των δεδομένων πραγματοποιείται με πρόγραμμα αναπτυγμένο σε γλώσσα LabVIEW. Με τη βοήθεια του προγράμματος αυτού καταγράφονται σε αρχείο τρεις τιμές μόνο από κάθε εισερχόμενο σήμα, η ελάχιστη τιμή του και οι δύο χρονικά γειτονικές τιμές (η προηγούμενη και η επόμενη). Αυτό γίνεται αφενός γιατί η ακρότατη τιμή είναι ανάλογη της ενέργειας και περιέχει όλη την απαιτούμενη πληροφορία και αφετέρου για να καταγράφονται τα δεδομένα με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ρυθμό. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται και για τα 4 σήματα (X_A , X_B , Y_C και Y_D) που παράγονται από κάθε καταγραφόμενο φωτόνιο με αποτέλεσμα για κάθε γεγονός να καταγράφονται 12 συνολικά τιμές για περαιτέρω offline επεξεργασία, όπως ανακατασκευή θέσης και ενέργειας.

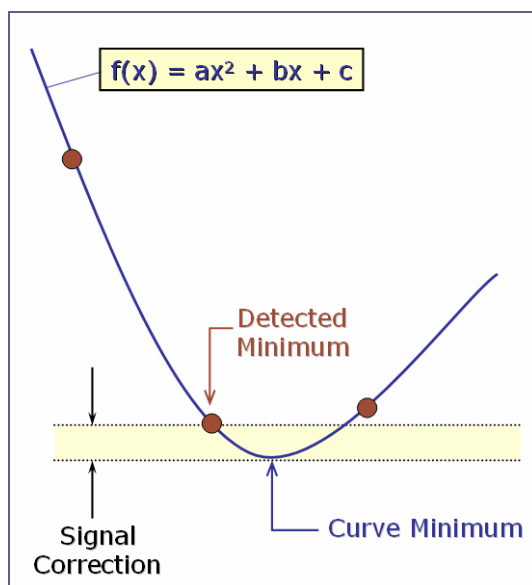


Σχήμα 4.10: Γραφικό περιβάλλον του προγράμματος καταγραφής δεδομένων σε LabVIEW.

Στο Σχήμα 4.10 βλέπουμε το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος στο οποίο έχουμε γραφική απεικόνιση των τεσσάρων σημάτων, του πραγματικού ρυθμού καταγραφής και μιας πρώτης προβολικής εικόνας που προκύπτει από την ανακατασκευή στους δύο ορθογώνιους άξονες της γ-Κάμερα.

4.3 Ανακατασκευή θέσης και ενέργειας

Επειδή η ψηφιοποίηση των τεσσάρων σημάτων γίνεται σε διακριτά χρονικά σημεία δεν είναι εκ των προτέρων σίγουρο ότι η καταγραφόμενη ακρότατη τιμή για κάθε σήμα αντιστοιχεί και στην πραγματικά ελάχιστη τιμή της. Μια πρώτη διόρθωση στην περίπτωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη και τα χρονικά γειτονικά σημεία, εκατέρωθεν του ελαχίστου. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται στα δεδομένα κατάλληλος αλγόριθμος με τον οποίο παρεμβαλάεται πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού στα 3 καταγραφόμενα φορτία κάθε σήματος, δηλαδή στο μετρούμενο ελάχιστο και το αμέσως προηγούμενο και επόμενο μετρούμενο φορτίο (κόκκινα σημεία του Σχήματος 4.11). Στη συνέχεια υπολογίζεται το ελάχιστο του τριωνύμου (μπλέ βέλος του Σχήματος 4.11) και καταγράφεται online στο αρχείο καταγραφής των δεδομένων επιπρόσθετα των προηγούμενων τιμών. Έτσι δημιουργείται νέα τετράδα διορθωμένων σημάτων (X_{ACOR} , X_{BCOR} , Y_{CCOR} και Y_{DCOR}) η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί offline στην επεξεργασία των δεδομένων.



Σχήμα 4.11: Εύρεση του πραγματικού ελαχίστου (μπλε βέλος) της κατανομής με την παρεμβολή τριωνύμου στα δεδομένα σημεία (κόκκινα σημεία).

Επειδή η διαδικασία αυτή της διόρθωσης γίνεται σε πραγματικό χρόνο (online) απαιτείται ο αλγόριθμος διόρθωσης να είναι βελτιστοποιημένος ως προς τα βήματα εκτέλεσής του. Η ανάλυση που ακολουθεί δίνει την τελική τιμή της διόρθωσης η οποία και έχει εισαχθεί στον κώδικα καταγραφής.

Θεωρώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή τον χρόνο και υποθέτοντας ότι το καταγραφέν σήμα αντιστοιχεί σε χρόνο $t=0$ τότε λόγω χρονικής συμμετρίας τα 3 καταγεγραμμένα (κόκκινα) σημεία έχουν συντεταγμένες $(-1, V_m)$, $(0, V_o)$ και $(1, V_p)$. Από αυτά θα υπολογιστεί αναλυτικά η τιμή της ελάχιστης τιμής του τριωνύμου V_{cor} . Γνωρίζοντας την γενική εξίσωση του τριωνύμου $f(x)=ax^2+bx+\gamma$ θα υπολογιστούν οι συντελεστές a , β και γ λύνοντας το παρακάτω σύστημα:

$$\alpha \cdot (-1)^2 + \beta \cdot (-1) + \gamma = V_m$$

$$\alpha \cdot 0^2 + \beta \cdot 0 + \gamma = V_o$$

$$\alpha \cdot (+1)^2 + \beta \cdot (+1) + \gamma = V_p$$

το οποίο εύκολα υπολογίζεται ότι έχει λύσεις τις:

$$\alpha = \frac{1}{2}(V_p + V_m - 2V_o)$$

$$\beta = \frac{1}{2}(V_p - V_m)$$

$$\gamma = V_o$$

Γνωρίζοντας ότι το τριώνυμο παρουσιάζει ελάχιστη τιμή στο $x_{\min} = -\beta/2\alpha$ την $f(x_{\min}) = \gamma - (\beta^2/4\alpha)$ έχουμε ότι:

$$V_{cor} = V_o - \frac{(V_p - V_m)^2}{8 \cdot (V_p + V_m - 2 \cdot V_o)}$$

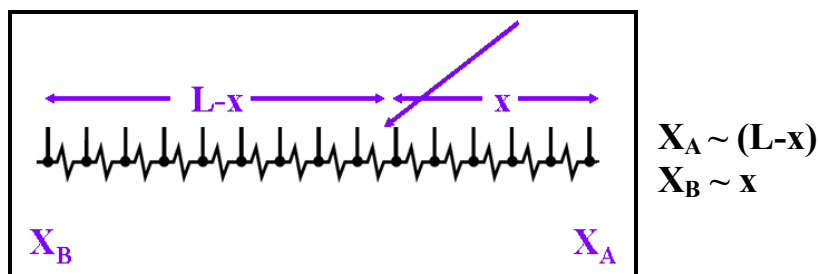
Μετά την καταγραφή των τιμών των τεσσάρων σημάτων (X_A , X_B , Y_C και Y_D) σε αρχείο, είναι δυνατή η ανακατασκευή της θέσης και της ενέργειας του γ -φωτονίου που έχει ανιχνευτεί. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τον παρακάτω αλγόριθμο σε κατάλληλες ρουτίνες οι οποίες εφαρμόζονται offline και event-by-event στα δεδομένα (είτε στα διορθωμένα είτε όχι):

$$X = \frac{X_A - X_B}{X_A + X_B}$$

$$Y = \frac{Y_C - Y_D}{Y_C + Y_D}$$

$$E = X_A + X_B + Y_C + Y_D$$

Δηλαδή, η θέση του καταγραφόμενου φωτονίου σε κάθε άξονα υπολογίζεται από τη διαφορά των αντίστοιχων σημάτων κανονικοποιημένη ως προς το άθροισμα τους ενώ το συνολικό φορτίο (ενέργεια) υπολογίζεται από το συνολικό άθροισμα των σημάτων. Είναι προφανές και διαπιστώνεται και από το Σχήμα 4.12 ότι όταν το νέφος ηλεκτρονίων προσπέσει κοντά σε ένα άκρο της ωμικής αλυσίδας το αντίστοιχο σήμα θα πάρει τιμή αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης.



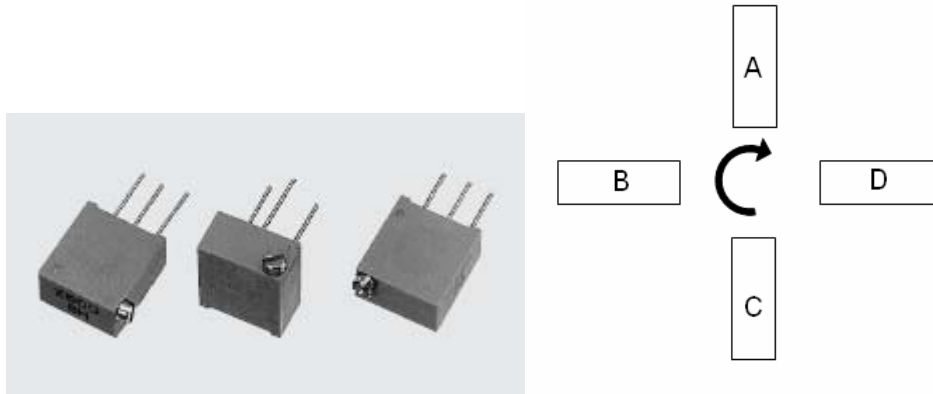
Σχήμα 4.12: Διαδικασία παραγωγής των σημάτων X_A και X_B ενός προσπίπτοντος γ -φωτονίου.

Η ανακατασκευή αυτή δίνει συντεταγμένες (X , Y) στο διάστημα $[-1, +1]$. Η μεταβλητή αυτή εκφράζει με άλλα λόγια την σχετική θέση στον άξονα, όπου η μηδενική τιμή ταυτίζεται με το κέντρο του πεδίου. Θεωρητικά, η απόλυτη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι ίση με 1, τιμή η οποία αντιστοιχεί στο άκρο του οπτικού πεδίου. Στην πραγματικότητα και εξαιτίας μη μηδενισμού του φορτίου το δυναμικό εύρος περιορίζεται σε τιμές μικρότερες της μονάδος.

4.4 Εξάρτηση προβολικής εικόνας από την ενίσχυση των φορτίων

Η ενίσχυση των τεσσάρων προενισχυτών στους οποίους οδηγείται και ενισχύεται το κάθε σήμα (X_A , X_B , Y_C , Y_D) καθορίζεται από τέσσερις trimmers (μοντέλο RJ9) 18 στροφών

[COR09] όπως φαίνονται σχηματικά στο 4.13 και βρίσκονται στο όπισθεν τμήμα του PSPMT.



Σχήμα 4.13: Αριστερά: Φωτογραφία των trimmers των προενισχυτών του PSPMT. Δεξιά: Η διάταξη των τεσσάρων trimmers στο όπισθεν τμήμα του PSPMT.

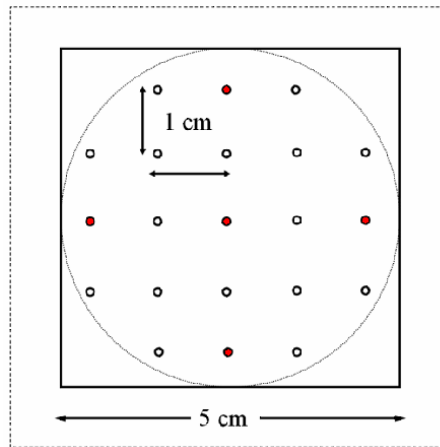
Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κάθε trimmer δίνονται στον Πίνακα 4.3.

Nominal resistance range	10Ω ~ 50MΩ
Resistance tolerance	+/- 10 %
Power ratings	0.5 W (70 °C) 0 W (120 °C)
Resistance law	Linear law
Maximum input voltage	DC 300 V or power rating, whichever is smaller
Maximum wiper current	100 mA or power rating whichever is smaller
Effective electrical turn	15 turns
End resistance	1% or 2 Ω, whichever is greater
C.R.V.	1% or 3 Ω, whichever is greater
Operating temperature range	-55~120°C
Temperature coefficient	10Ω, 20Ω, 5MΩ : +/- 250 10 ⁻⁸ /°C maximum 50Ω ~ 2MΩ : +/- 100 10 ⁻⁸ /°C maximum
Insulation resistance	1000MΩ minimum (DC500V)
Dielectric strength	AC900 V, 60 s
Net weight	Approx. 0.75g

Πίνακας 4.3: Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του RJ9 trimmer.

Για τη μελέτη της επίδρασης της ενίσχυσης των προενισχυτών του PSPMT στην ανακατασκευή της θέσης, δηλαδή πως (και αν) μεταβάλλονται οι συντεταγμένες της ανακατασκευασμένης θέσης ενός γεγονότος για διάφορες τιμές της ενίσχυσής τους, χρησιμοποιήθηκε LED οπτικού φωτός με το οποίο φωτίστηκε η επιφάνεια του PSPMT σε

διάφορα σημεία. Η τοποθέτηση του LED έγινε με τη βοήθεια ενός πλέγματος (21 δυνατών ισαπεχόντων θέσεων) από το οποίο επιλέχθηκαν 5 θέσεις όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.14 (με κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 4.14: Το πλέγμα των 21 δυνατών θέσεων όπου οι επιλεγμένες θέσεις εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα.

Συνολικά καταγράφηκαν 1000 γεγονότα για κάθε θέση του LED στο πλέγμα, έχοντας υψηλή τάση 850V και οπτικό παλμό με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 4.4.

Shape	square
Width	1 μ s
Amplitude	2.5 V
Frequency	2 kHz

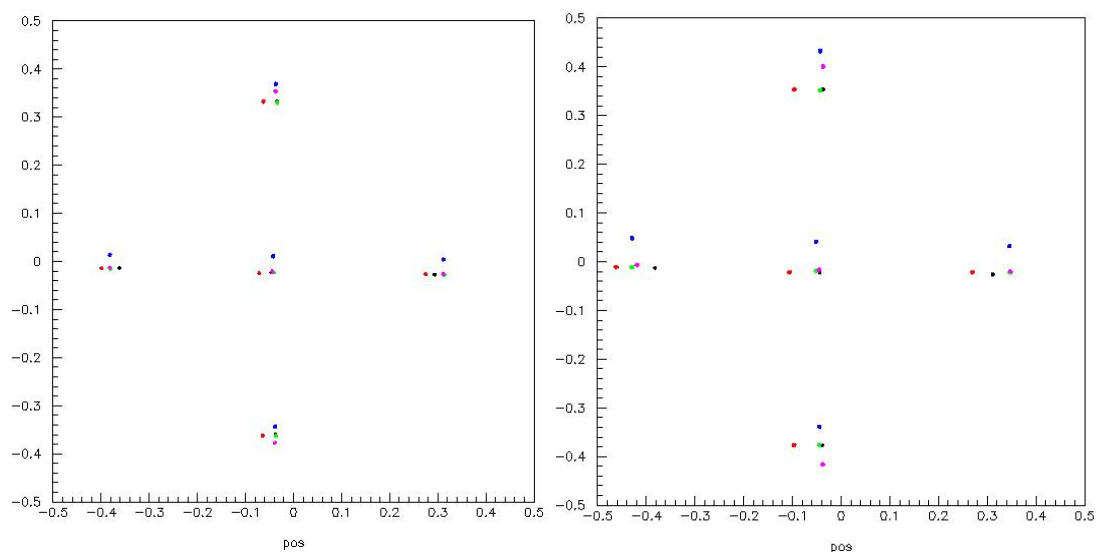
Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά του οπτικού παλμού που οδηγήθηκε στην επιφάνεια του PSPMT.

Στη συνέχεια έγινε λήψη δεδομένων για 13 σετ μετρήσεων με δυνατές τιμές στροφών των trimmers 0, 6, 12 και 18 χρησιμοποιώντας τους συνδυασμούς που φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

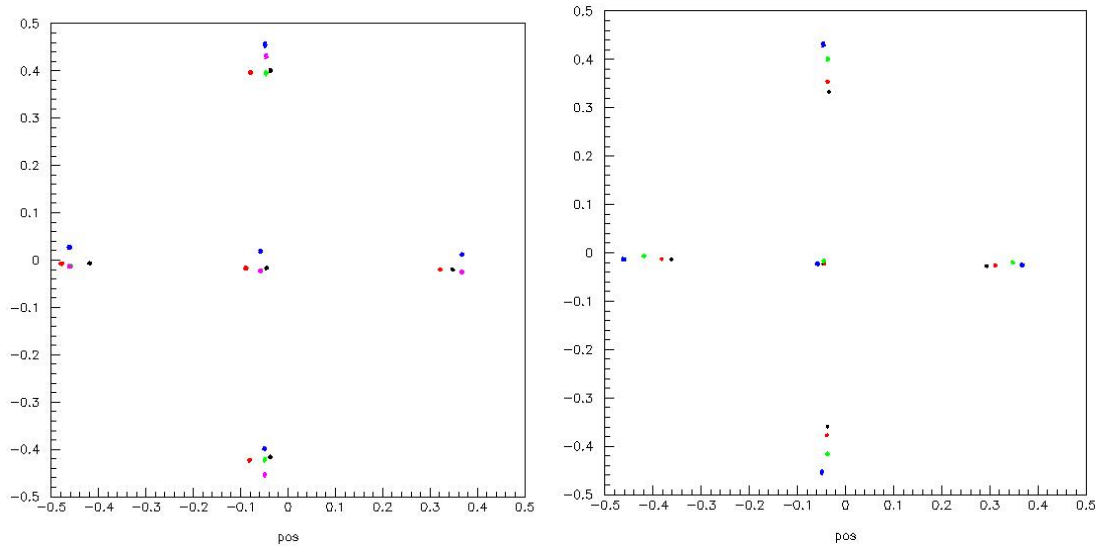
A	B	C	D	File name
18	18	18	18	RJ9_3333.dat
12	18	18	18	RJ9_2333.dat
12	12	18	18	RJ9_2233.dat
12	12	12	18	RJ9_2223.dat
12	12	12	12	RJ9_2222.dat
6	12	12	12	RJ9_1222.dat
6	6	12	12	RJ9_1122.dat
6	6	6	12	RJ9_1112.dat
6	6	6	6	RJ9_1111.dat
0	6	6	6	RJ9_0111.dat
0	0	6	6	RJ9_0011.dat
0	0	0	6	RJ9_0001.dat
0	0	0	0	RJ9_0000.dat

Πίνακας 4.5: Οι στροφές καθενός από τους 4 trimmers για τα 13 σετ μετρήσεων.

Στα Σχήματα 4.15α και 4.15β παραθέτουμε τις προβολικές εικόνες που προκύπτουν από τις παραπάνω μετρήσεις. Για ευκολότερη μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων παραβάλουμε ορισμένα σετ μετρήσεων (όπως αναφέρονται στον Πίνακα 4.5) σε κάθε εικόνα. Παρατηρώντας τα δεδομένα, διαπιστώνεται ότι μεταβάλλοντας την ενίσχυση των 4 προενισχυτών οι συντεταγμένες της (ανακατασκευασμένης) θέσης δεν παραμένουν σταθερές αλλά μεταβάλλονται. Η μεταβολή αυτή οδηγεί σε ομοιόμορφη μεγέθυνση ή συρρίκνωση του (ανακατασκευασμένου) οπτικού πεδίου της Κάμερας μόνο στις περιπτώσεις που μεταβάλλεται ισόποσα η ενίσχυση και των 4 προενισχυτών (Σχήμα 4.15β - δεξιά). Ειδικότερα, αυξάνοντας (δεξιόστροφη κίνηση) τις στροφές των trimmers παρατηρείται ακτινική μετατόπιση κάθε σημείου από την περιφέρεια προς το κέντρο, δηλαδή συρρίκνωση του (ανακατασκευαζόμενου) οπτικού πεδίου της γ-Κάμερα. Επιπλέον, σε κάθε περίπτωση ίσης ενίσχυσης η απεικόνιση της θέσης του κεντρικού σημείου παραμένει σχεδόν σταθερή και ανεξάρτητη της ενίσχυσης των προενισχυτών. Από την προηγούμενη παρατήρηση συμπεραίνεται ότι η ισόποση μεταβολή της ενίσχυσης των προενισχυτών προκαλεί μεταβολή στην απεικονιζόμενη θέση του καταγραφόμενου γεγονότος η οποία εξαρτάται από την θέση πρόσπτωσης του στην επιφάνεια του PSPMT. Για την διερεύνηση της εξάρτησης αυτής απαιτούνται δεδομένα από περισσότερες θέσεις του LED πάνω στο πλέγμα.

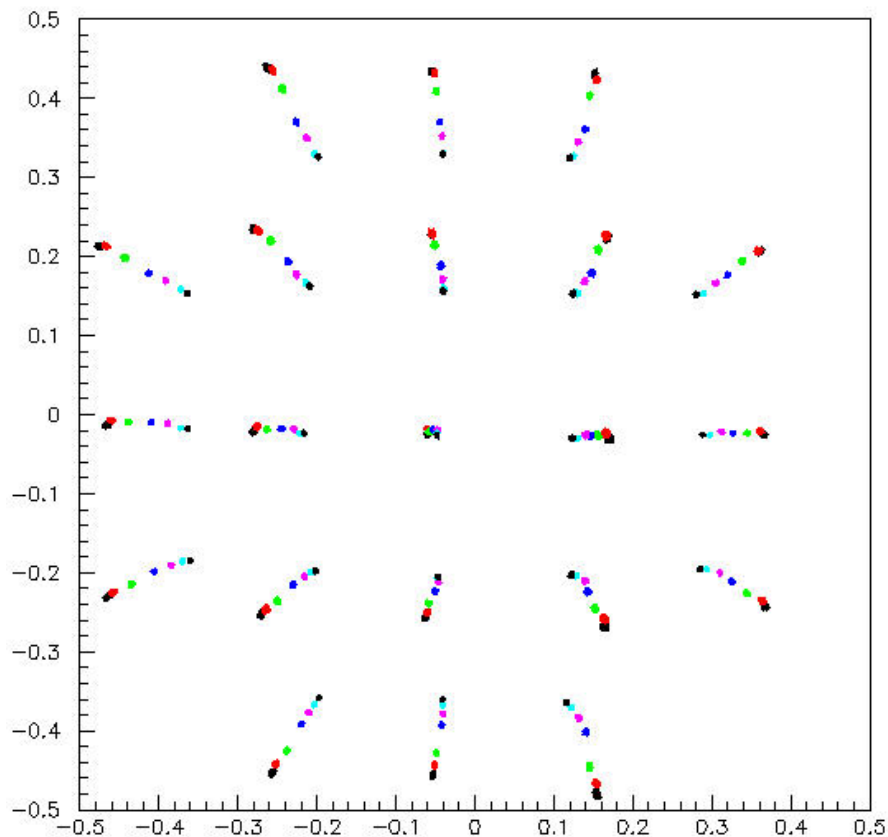


Σχήμα 4.15α: Προβολική εικόνα της θέσης του LED τοποθετημένου σε 5 θέσεις του πλέγματος για 5 σετ μετρήσεων του πίνακα 2 σε κάθε θέση. **Αριστερά:** 3333 (μαύρο), 2333 (κόκκινο), 2233 (πράσινο), 2223(μπλε), 2222 (μωβ). **Δεξιά:** 2222 (μαύρο), 1222 (κόκκινο), 1122 (πράσινο), 1112 (μπλε) 1111 (μωβ).



Σχήμα 4.15β: Προβολική εικόνα της θέσης του LED τοποθετημένου σε 5 θέσεις του πλέγματος για 5 (αριστερά) και 4 (δεξιά) σετ μετρήσεων του πίνακα 2 σε κάθε θέση . **Αριστερά:** 1111 (μαύρο), 0111 (κόκκινο), 0011 (πράσινο), 0001 (μπλε), 0000 (μωβ). **Δεξιά:** 3333 (μαύρο), 2222 (κόκκινο), 1111 (πράσινο), 0000 (μπλε).

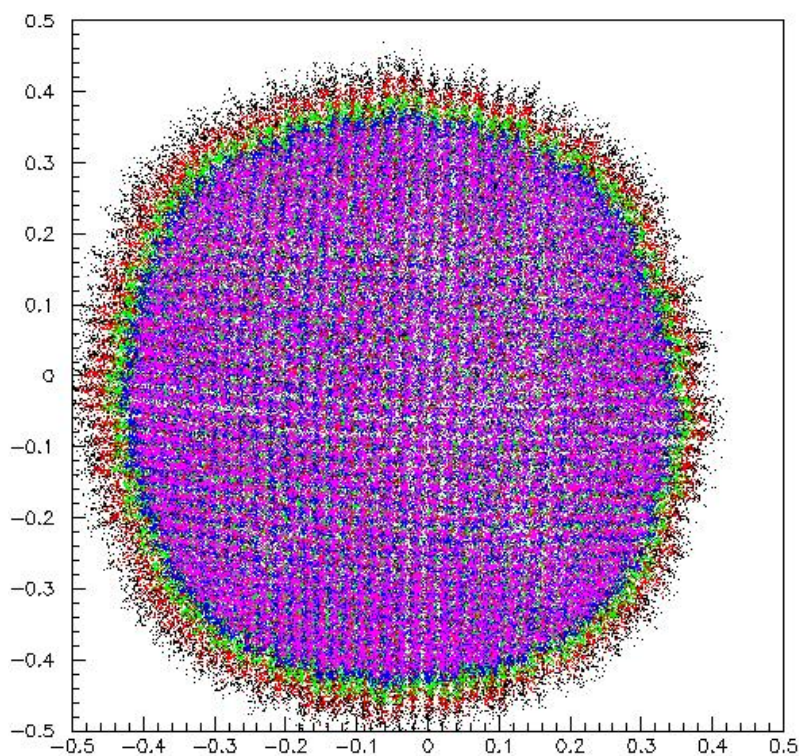
Έτσι καταγράφηκαν δεδομένα και για τις 21 θέσεις του πλέγματος για 7 ίσες τιμές της ενίσχυσης (δηλαδή για 7 ίσες τιμές στροφών των trimmers) των προενισχυτών. Η προβολική εικόνα που προκύπτει από τα δεδομένα αυτά απεικονίζεται στο Σχήμα 4.16



Σχήμα 4.16: Προβολική εικόνα των δεδομένων του LED σε 21 διαφορετικές θέσεις του PSPMT για 7 τιμές στροφών των trimmers των προενισχυτών – 0 (μαύρο εξωτερικό), 3 (κόκκινο), 6 (πράσινο), 9 (μπλε), 12 (μωβ), 15 (γαλάζιο) και 18 (μαύρο εσωτερικό).

Παρατηρείται, όπως αναμένεται, η συρρίκνωση του (ανακατασκευαζόμενου) οπτικού πεδίου με την αύξηση της τιμής της ενίσχυσης και η εξάρτηση της ανακατασκευής της θέσης από αυτήν. Ειδικότερα, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του προσπίπτοντος γεγονότος από το κέντρο του PSPMT τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της μεταβολής της ενίσχυσης στην ανακατασκευή της θέσης του (ξεκινώντας από μηδενικές τιμές μεταβολής στο κέντρο του οπτικού πεδίου του συστήματος).

Στη συνέχεια παρατηρήθηκε η μεταβολή του οπτικού πεδίου του συστήματος από την ενίσχυση των προενισχυτών χρησιμοποιώντας ραδιενεργή πηγή. Ακτινοβολώντας τον διακριτοποιημένο κρύσταλλο CsI(Tl), πάχους 4mm, με ραδιενεργή πηγή ^{60}Co (σε απόσταση περίπου 10cm από την επιφάνεια του) για 5 διαφορετικές τιμές στροφών των trimmers, προκύπτει η προβολική του εικόνα του Σχήματος 4.17. Παρατηρείται ξανά η αναμενόμενη μεγέθυνση του (ανακατασκευασμένου) οπτικού πεδίου της Κάμερας με την ελάττωση της ενίσχυσης των προενισχυτών.



Σχήμα 4.17: Προβολική εικόνα του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) ύστερα από ακτινοβόληση του χρησιμοποιώντας πηγή ^{60}Co (σε απόσταση 10cm από την επιφάνεια του) για 5 διαφορετικές τιμές στροφών των trimmers (15, 12, 9, 6 και 3) με μοβ, μπλε, πράσινα, κόκκινα και μαύρα σημεία αντίστοιχα.

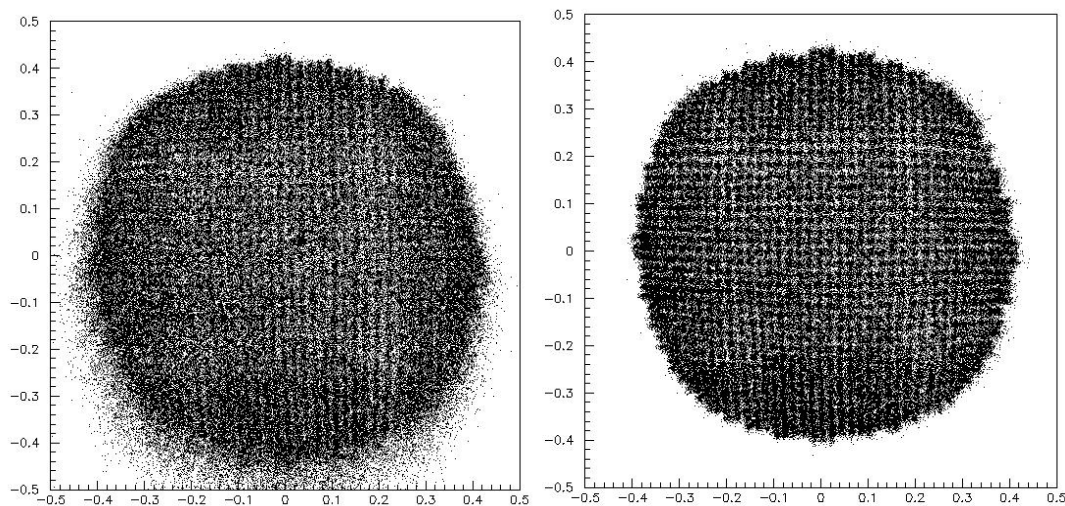
Ύστερα ελέγχθηκε η εξάρτηση της απεικόνισης της θέσης του LED σε συνάρτηση με την υψηλή τάση, διατηρώντας σταθερή την ενίσχυση των προενισχυτών (οι trimmers στραμμένοι κατά 9 στροφές). Παρατηρήθηκε ότι μεταβάλλοντας την υψηλή τάση (δηλαδή μεταβάλλοντας την ενίσχυση των εισερχόμενων στον PSPMT παλμών) η ανακατασκευή της

θέσης του LED αλλάζει. Αυτό δείχνει ότι αν στην ίδια θέση του κρυστάλλου προσπέσουν 2 φωτόνια διαφορετικής ενέργειας τότε αυτά θα απεικονιστούν σε διαφορετική θέση στην ληφθείσα προβολική εικόνα. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε σημαντική υποβάθμιση της διακριτικής ικανότητας του συστήματος. Για το λόγο αυτό έγινε προσπάθεια εύρεσης του κατάλληλου συνδυασμού στροφών των trimmers ώστε να εξαλειφθεί αυτό το φαινόμενο. Ο κατάλληλος αυτός συνδυασμός φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 4.6.

Trimmer	Στροφές
A	10.5
B	10.0
C	10.0
D	11.5

Πίνακας 4.6: Ο κατάλληλος συνδυασμός στροφών των trimmers στις οποίες δεν παρατηρείται το φαινόμενο της μεταβολής της απεικόνισης της θέσης από την ενέργεια του προσπίπτοντος γ-φωτονίου.

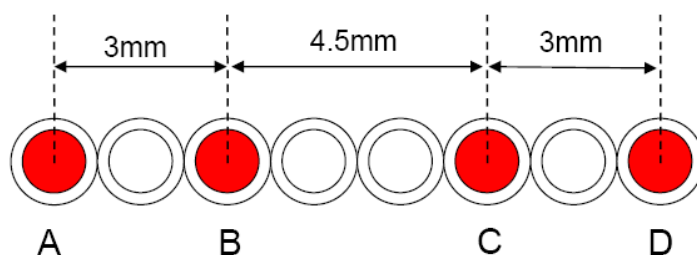
Στο Σχήμα 4.18 φαίνεται η προβολική εικόνα του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) (χωρίς να γίνει ενεργειακό φιλτράρισμα) πριν (δηλαδή κατά την εργοστασιακή τους ρύθμιση) και μετά την ρύθμιση της ενίσχυσης των προενισχυτών ύστερα από ακτινοβόληση του από ραδιενεργή πηγή ^{60}Co . Η διαφορά στην διακριτική ικανότητα των δύο εικόνων είναι πολύ μεγάλη (μετά τη ρύθμιση μπορούμε να διακρίνουμε τα pixels του κρυστάλλου ενώ πριν όχι) γεγονός που καθιστά τη ρύθμιση που έγινε πολύ σημαντική στην βελτιστοποίηση του συστήματος.



Σχήμα 4.18: Προβολική εικόνα του σπινθηριστή κρυστάλλου CsI(Tl) πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη ρύθμιση της ενίσχυσης των προενισχυτών (χωρίς τη χρήση ενεργειακών φίλτρων) μετά από ακτινοβόλησή του χρησιμοποιώντας ραδιενεργή πηγή ^{60}Co .

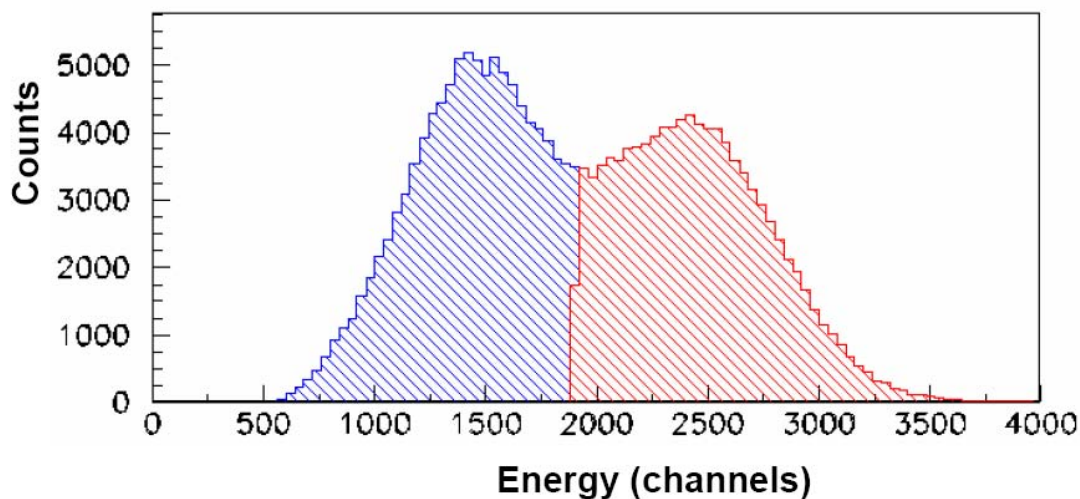
4.5 Εκτίμηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας

Μετά την σύνθεση του συστήματος της γ-Κάμερα εκτιμάται η χωρική διακριτική ικανότητα του συστήματος σε προβολικό επίπεδο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ομοίωμα από 4 «θερμούς» τριχοειδείς σωλήνες (που περιέχουν υδατικό διάλυμα ραδιενεργού ^{99m}Tc) και 5 «ψυχρούς» (που δεν περιέχουν ^{99m}Tc) σύμφωνα με τη διάταξη του Σχήματος 4.19. Τα «ψυχρά» τριχοειδή χρησιμεύουν στον υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ των θερμών. Κατά την εκτέλεση του πειράματος τοποθετήθηκε το ομοίωμα στην επιφάνεια του κατευθυντήρα. Κάθε τριχοειδής σωλήνας έχει εσωτερική διάμετρο 1.1mm και εξωτερική 1.5mm.



Σχήμα 4.19: Το ομοίωμα των τριχοειδών που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της προβολικής χωρικής διακριτικής ικανότητας του συστήματος. Με κόκκινο χρώμα είναι τα «θερμά» (που περιέχουν ^{99m}Tc) ενώ με άσπρο τα «ψυχρά» (που δεν περιέχουν ^{99m}Tc) τριχοειδή.

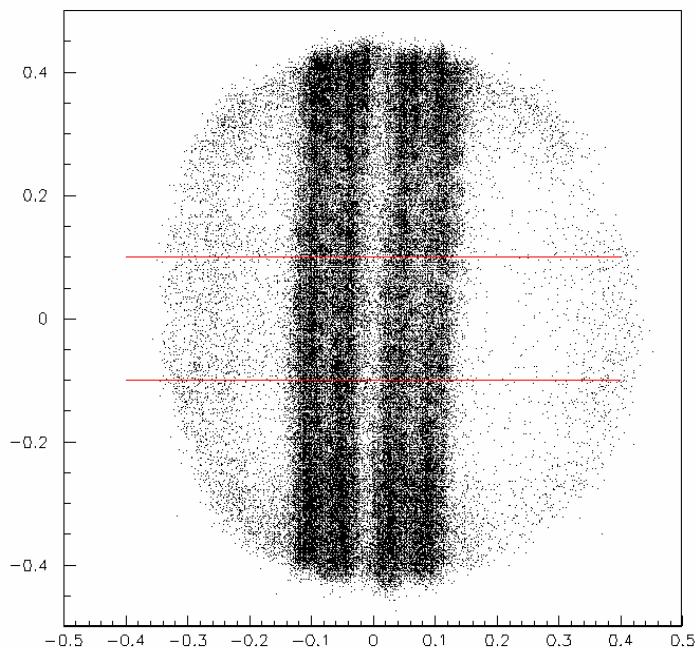
Μετά τη λήψη των δεδομένων υπολογίστηκε το ενεργειακό φάσμα το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.20: Ενεργειακό φάσμα του ^{99m}Tc όπως μετρήθηκε με τον διακριτοποιημένο κρύσταλλο CsI(Tl) πάχους 4mm. Η κόκκινη περιοχή είναι η περιοχή της φωτοκορυφής ενώ η μπλε η περιοχή Compton.

Παρατηρείται ότι διαχωρίζεται ευκρινώς η φωτοκορυφή του ^{99m}Tc παρά το μικρό πάχος του κρυστάλλου (4mm) λόγω της χαμηλής ενέργειας των φωτονίων του ^{99m}Tc (140keV). Η κόκκινη περιοχή είναι η περιοχή της ενέργειας της φωτοκορυφής

Με κόκκινη γραμμή είναι το κάτω όριο του φιλτραρίσματος των χαμηλοενεργειακών φωτονίων (δηλαδή απορρίπτονται τα σκεδαζόμενα φωτόνια είτε στον κατευθυντήρα είτε στον κρύσταλλο) που θα χρησιμοποιηθεί κατά την ανακατασκευή της θέσης των τριχοειδών. Η προβολική εικόνα του ομοιώματος φαίνεται στο Σχήμα 4.21. Παρατηρούμε ότι διακρίνονται όλα τα τριχοειδή ακόμα και στην περίπτωση της μικρότερης απόστασης τους, των 1.5mm.



Σχήμα 4.21: Προβολική εικόνα του ομοιώματος των τριχοειδών. Με κόκκινο χρώμα είναι τα όρια της περιοχής στην οποία θα εκτιμηθεί η χωρική διακριτική ικανότητα.

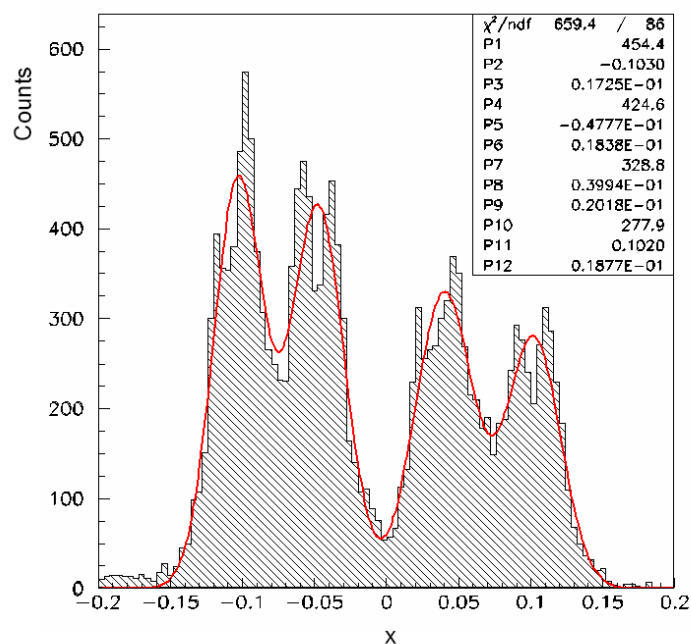
Για να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας του συστήματος επιλέχθηκε η περιοχή μεταξύ των τιμών [-0.1, 0.1] όπως φαίνεται από τις κόκκινες οριζικές γραμμές της προβολικής εικόνας του Σχήματος 4.21. Για την περιοχή αυτή υπολογίζεται το μονοδιάστατο διάγραμμα προβολών των τριχοειδών το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.22. Παρεμβάλλοντας 4 γκαουσιανές (μια για κάθε τριχοειδές) καμπύλες της μορφής

$$y = A \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$$

στα δεδομένα, παίρνουμε τα αποτελέσματα που καταγράφονται στον Πίνακα 4.8.

	A	B	C	D
A	454±9	425±9	329±7	278±7
x₀	-0.1030±0.0005	-0.0478±0.0005	0.0399±0.0006	0.1020±0.0007
σ	0.0173±0.0004	0.0184±0.0005	0.0202±0.0006	0.0188±0.0005

Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά των γκαουσιανών που περιγράφουν τα 4 τριχοειδή.



Σχήμα 4.22: Μονοδιάστατη προβολή των 4 τριχοειδών κατά τον x-άξονα. Με κόκκινο χρώμα είναι οι 4 γκαουσιανές καμπύλες που περιγράφουν την κατανομή.

Στον Πίνακα 4.9 φαίνονται αποστάσεις μεταξύ κορφών (για διαφορετικούς συνδυασμούς αυτών) των γκαουσιανών σε μονάδες συστήματος με τις αντίστοιχες πραγματικές αποστάσεις σε mm. Επιπλέον υπολογίζεται ο συντελεστής μετατροπής coeff των μονάδων συστήματος σε mm.

	Μετρούμενη απόσταση (μονάδες συστήματος)	Πραγματική απόσταση (mm)	coeff (mm/μονάδες συστήματος)
AB	0.0552	3.0	54.35
CD	0.0621	3.0	48.31
BC	0.0877	4.5	51.31
AD	0.2050	10.50	51.22

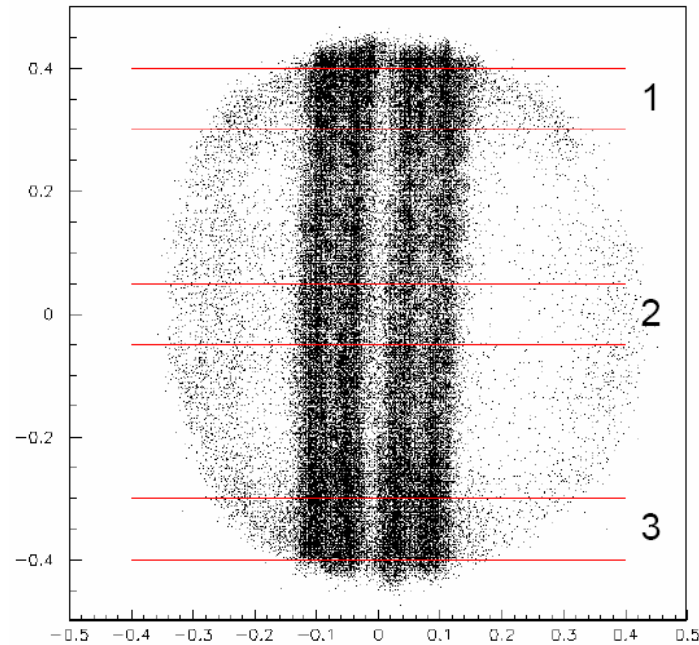
Πίνακας 4.9: Αποστάσεις των κορφών των γκαουσιανών μετρούμενες (σε μονάδες συστήματος) με τις αντίστοιχες πραγματικές (σε mm).

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα βρίσκουμε τον μέσο συντελεστή μετατροπής $\langle \text{coeff} \rangle = 51.30$ mm/μονάδες συστήματος. Ο συντελεστής αυτός θα χρησιμοποιηθεί για την μετατροπή της μέσης τιμής του σ σε mm και την πρώτη εκτίμηση της διακριτικής ικανότητας του συστήματος. Είναι $\langle \sigma \rangle = 0.0187 \cdot 51.30 = 0.959$ mm και $\delta \langle \sigma \rangle = 0.026$ mm. Άρα :

$$\langle \sigma \rangle = (0.959 \pm 0.026) \text{mm}$$

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η χωρική διακριτική ικανότητα του συστήματος είναι καλύτερη από 1mm τιμή πολύ ικανοποιητική λαμβάνοντας ότι τα εμπορικά συστήματα

παρουσιάζουν αντίστοιχες τιμές της τάξης των 2.5mm. Όμως η προηγούμενη διακριτική ικανότητα που μετρήθηκε αφορά τις κεντρικές περιοχές του οπτικού πεδίου του συστήματος. Για να ελεγχθεί η εξάρτηση της από τη περιοχή του οπτικού πεδίου που υπολογίζεται, έγινε υπολογισμός της (ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως) για 3 διαφορετικές περιοχές του οπτικού πεδίου όπως αυτές φαίνονται στο Σχήμα 4.23.



Σχήμα 4.23: Οι 3 διαφορετικές περιοχές στις οποίες μετρήθηκε η χωρική διακριτική ικανότητα.

Τα αποτελέσματα για τις 3 διαφορετικές περιοχές φαίνονται στον Πίνακα 4.12.

Περιοχή	$\sigma(\text{mm})$
1	1.006 ± 0.036
2	0.950 ± 0.036
3	1.051 ± 0.028

Πίνακας 4.12: Οι τιμές του εύρους της γκαουσιανής σ για τις 3 επιλεγμένες περιοχές

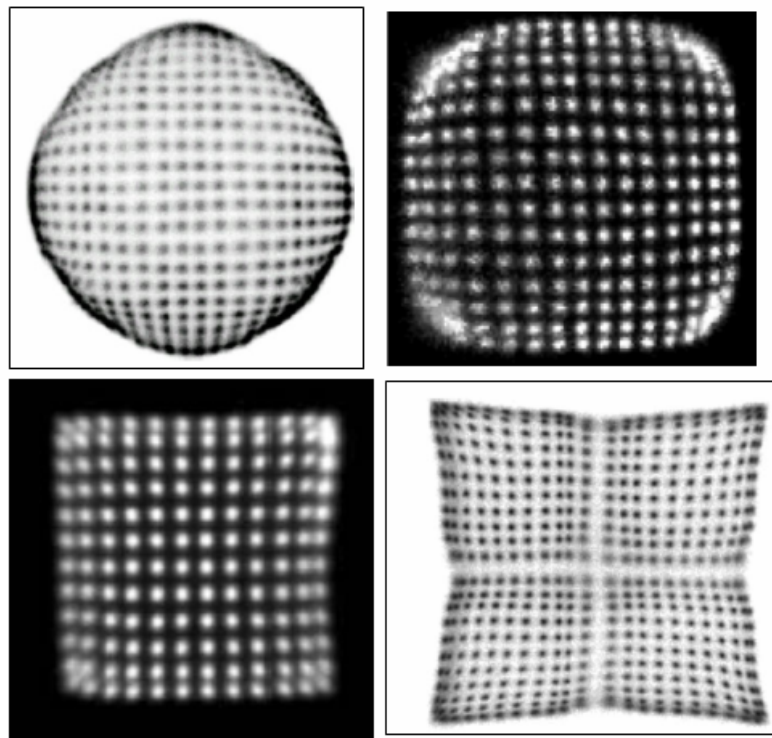
Παρατηρείται ότι στην κεντρική περιοχή (περιοχή 2) η διακριτική ικανότητα παίρνει την καλύτερη (χαμηλότερη) τιμή ενώ στις περιφερειακές περιοχές η τιμή της χειροτερεύει λίγο παίρνοντας μεγαλύτερες τιμές (λίγο μεγαλύτερες του 1mm). Οι λόγοι που οφείλεται το φαινόμενο αυτό θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μέθοδοι Διόρθωσης Χωρικών Παραμορφώσεων και Ανομοιογένειας Προβολικών Εικόνων

5.1 Μέθοδος διόρθωσης της χωρικής παραμόρφωσης

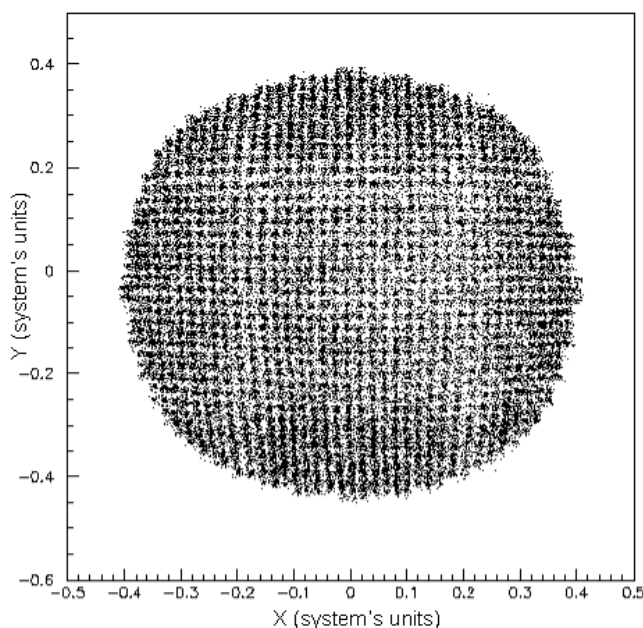
Στον ερευνητικό χώρο της Πυρηνικής Ιατρικής τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί σύγχρονα συστήματα γ-Κάμερα μικρού οπτικού πεδίου βασισμένα στη χρήση ενός χωρικά ευαίσθητου φωτοπολλαπλασιαστή (Position Sensitive PhotoMultiplier Tube - PSPMT) [LOU03], [PAN03], [SAN06], [TRO07] με τον οποίο, όπως έχουμε αναφέρει, είναι δυνατός ο υπολογισμός όχι μόνο της ενέργειας αλλά και της θέσης του προσπίπτοντος γ-φωτονίου. Τα συστήματα αυτά έχουν πλεονεκτήματα έναντι των εμπορικά διαθέσιμων κλινικών συσκευών, όπως καλύτερη χωρική διακριτική ικανότητα (<1mm), σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής και δυνατότητα μεταφοράς λόγω του μικρού βάρους. Η συμβολή τους στην απεικόνιση μικρών ανθρωπίνων οργάνων ή μικρών ζώων είναι πολύ σημαντική τόσο για την ανάπτυξη ραδιοφαρμάκων αλλά και την εξειδικευμένη διαγνωστική απεικόνιση. Παρόλα αυτά η ύπαρξη χωρικών παραμορφώσεων στο ενεργό οπτικό πεδίο τους αποτελεί κοινό πρόβλημα στα συστήματα αυτά, όπως φαίνεται σε στις εικόνες του Σχήματος 5.1 [JEO04], [PAN02], [FER04], [BAK05].



Σχήμα 5.1: Γνωστά προβλήματα χωρικής παραμόρφωσης και έλλειψης ομοιογένειας συστημάτων γ-Κάμερα μικρού οπτικού πεδίου που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

Τα προβλήματα αυτά υποβαθμίζουν την ποιότητα και την κλινική αξία της εικόνας, συνεπώς είναι απαραίτητη η ανάπτυξη τεχνικών διόρθωσης ώστε να αντιμετωπιστούν πρωτογενώς τα προβλήματα αυτά και να βελτιωθούν οι αντίστοιχες λήψεις των προβολικών εικόνων. Βιβλιογραφικά είναι γνωστές διάφορες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί προς την κατεύθυνση αυτή [BUV95], [JOH96].

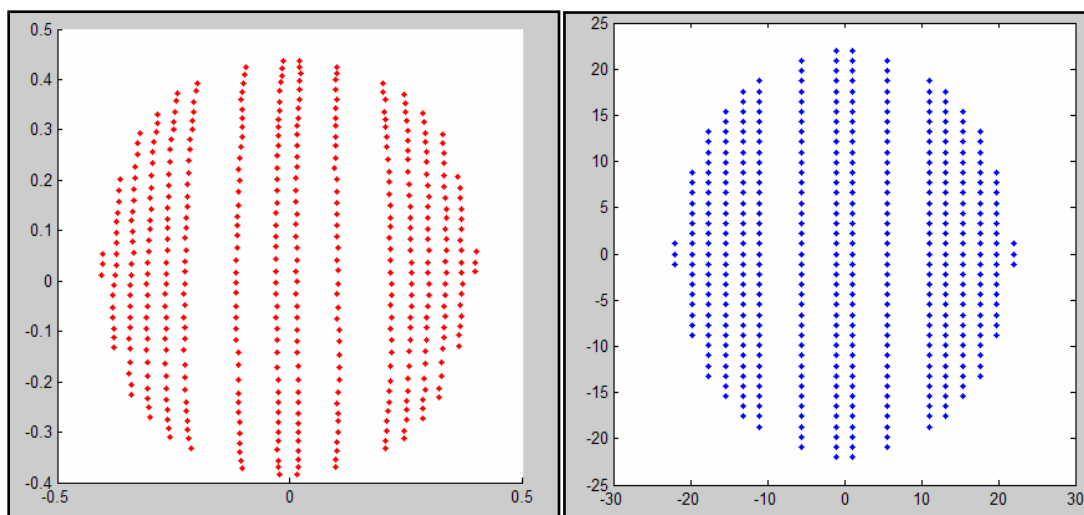
Για την αξιολόγηση της έκτασης του φαινομένου της χωρικής παραμόρφωσης του υπό σύνθεση συστήματος γ-Κάμερα του εργαστηρίου, χρησιμοποιήθηκε σημειακή ραδιενεργή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη σε απόσταση 8cm από τον διακριτοποιημένο κρύσταλλο CsI(Tl) πάχους 4mm, χωρίς τη χρήση κατευθυντήρα. Η προβολική εικόνα μετά την ακτινοβολία (και το offline φιλτράρισμα των χαμηλο-ενεργειακών φωτονίων από σκεδάσεις Compton) φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Λόγω της ιδιαίτερα υψηλής ενέργειας των φωτονίων του ^{60}Co (1.17MeV και 1.33MeV) τα pixel (τετραγωνικά διαστάσεων 1mm x 1mm) του κρυστάλλου φαίνονται καθαρά στην προβολική εικόνα, η οποία θα αναφέρεται στη συνέχεια και ως «εικόνα βαθμονόμησης». Ωστόσο, η βαρελοειδής χωρική παραμόρφωση, εντονότερη στην περιφέρεια του οπτικού πεδίου, είναι ένα εμφανές πρόβλημα της προβολικής εικόνας και υποβαθμίζει την ποιότητά της.



Σχήμα 5.2: Προβολική εικόνα από ακτινοβολία διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) εύρους pixel 1mm και πάχους 4mm, με ^{60}Co (σημειακή πηγή σε απόσταση 8cm) χωρίς κατευθυντήρα μετά από offline φιλτράρισμα των χαμηλο-ενεργειακών φωτονίων.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε για να διορθωθεί η χωρική παραμόρφωση [THA08], [THA09a] χρησιμοποιεί δύο πίνακες, τον πίνακα διόρθωσης και τον πίνακα αναφοράς. Ο πίνακας διόρθωσης περιέχει τις πειραματικά μετρούμενες συντεταγμένες (X_i , Y_i) των pixel συγκεκριμένων επιλεγμένων στηλών από την εικόνα βαθμονόμησης. Κατά κανόνα επιλέγονται τυχαία κατανεμημένα σημεία, δίνοντας όμως βαρύτητα στην επιλογή

περισσότερων από την περιφερειακή περιοχή του οπτικού πεδίου του συστήματος επειδή η χωρική παραμόρφωση εκεί είναι εντονότερη και λιγότερων από την κεντρική περιοχή όπου η χωρική παραμόρφωση παρατηρείται λιγότερο έντονα. Οι συντεταγμένες καθενός pixel εξάγονται από την εικόνα βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας αλγόριθμο γραμμένο σε FORTRAN και ο οποίος χρησιμοποιεί το γραφικό περιβάλλον HIGZ (High level Interface of Graphics and ZEBRA) του CERN [HIG95], έτσι ώστε να αυτοματοποιείται η συλλογή και καταγραφή των σημείων ενδιαφέροντος. Ο πίνακας αναφοράς περιέχει τις αντίστοιχες ονομαστικές συντεταγμένες (X_t', Y_t') των pixels που έχουν επιλεγεί και οι οποίες είναι εύκολο να υπολογιστούν από τη γεωμετρία του κρυστάλλου λαμβάνοντας υπόψη ότι τα pixel είναι τετράγωνα, πλευράς 1mm και το epoxy έχει πάχος 0.1mm. Για δοσμένο προσανατολισμό του κρυστάλλου (θέση αναφοράς) και λόγω της διακριτότητας των pixels οι ονομαστικές συντεταγμένες των επιλεγμένων σημείων είναι κατά συνέπεια απόλυτα καθορισμένες. Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζονται οι στήλες που έχουν επιλεγεί από την εικόνα βαθμονόμησης οι οποίες αποθηκεύονται στον πίνακα διόρθωσης (αριστερά) και οι αντίστοιχες ονομαστικές τους θέσεις οι οποίες αποθηκεύονται στον πίνακα αναφοράς (δεξιά).



Σχήμα 5.3: **Αριστερά:** Τα πειραματικά μετρούμενα pixels τα οποία έχουν επιλεγεί από την εικόνα βαθμονόμησης και αποθηκεύονται στον πίνακα διόρθωσης. Οι συντεταγμένες τους μετρούνται σε μονάδες συστήματος. **Δεξιά:** Οι αντίστοιχες ονομαστικές θέσεις των επιλεγμένων pixel γνωστές από την γεωμετρία του κρυστάλλου που αποθηκεύονται στον πίνακα αναφοράς. Οι συντεταγμένες τους μετρούνται σε mm.

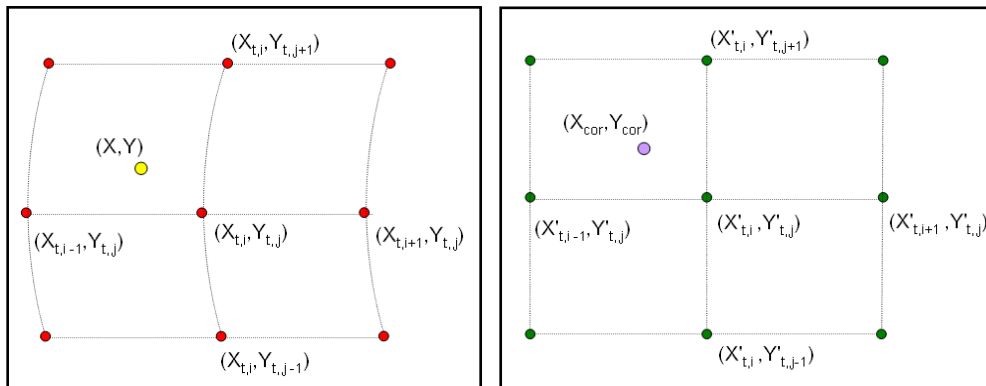
Ο φορμαλισμός που ακολουθείται για την διόρθωση των συντεταγμένων (X, Y) ενός πειραματικά μετρούμενου σημείου περιγράφεται στη συνέχεια. Αρχικά υπολογίζονται οι λόγοι a και b :

$$a = \frac{X - X_{t,i}}{X_{t,i+1} - X_{t,i-1}} \quad \text{και} \quad b = \frac{Y - Y_{t,j}}{Y_{t,j+1} - Y_{t,j-1}} \quad (5.1)$$

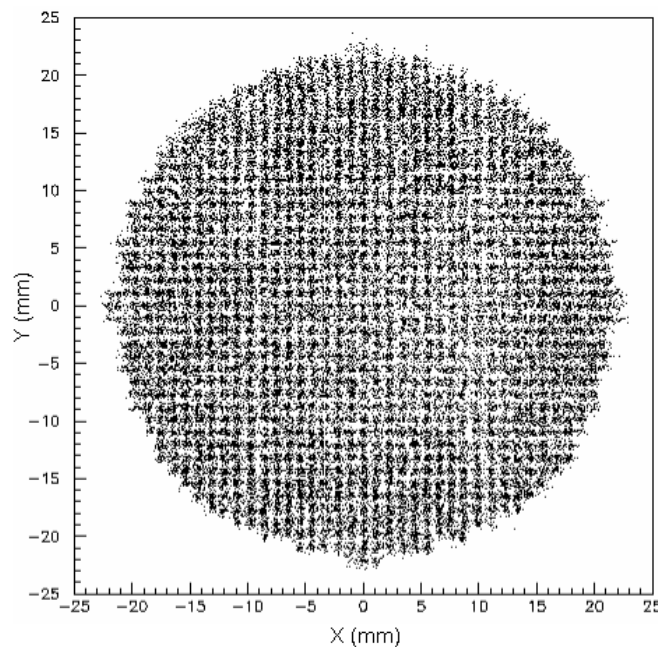
όπου $(X_{t,i}, Y_{t,j})$ οι συντεταγμένες του πλησιέστερου σημείου, αποθηκευμένου στον πίνακα διόρθωσης, στο πειραματικό σημείο μέτρησης (X, Y) . Συνεπώς, οι διορθωμένες του συντεταγμένες (X_{cor}, Y_{cor}) υπολογίζονται από τους τύπους:

$$X_{cor} = X'_{t,i} + a \cdot (X'_{t,i+1} - X'_{t,i-1}) \quad \text{και} \quad Y_{cor} = Y'_{t,j} + a \cdot (Y'_{t,j+1} - Y'_{t,j-1}) \quad (5.2)$$

όπου $(X'_{t,i}, Y'_{t,j})$ οι αντίστοιχες ονομαστικές συντεταγμένες του $(X_{t,i}, Y_{t,j})$ όπως είναι αποθηκευμένες στον πίνακα αναφοράς. Η παραπάνω διαδικασία είναι μια εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής σε 2 διαστάσεις και περιγράφεται σχηματικά στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Σχηματική περιγραφή του αλγορίθμου διόρθωσης και χωρικής παραμόρφωσης. Το πειραματικά μετρούμενο σημείο (X, Y) της αριστερής εικόνας διορθώνεται στη θέση (X_{cor}, Y_{cor}) της δεξιάς εικόνας με βάση τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται στη μέθοδο παρεμβολής στο επίπεδο, κάνοντας χρήση επιλεγμένων σημείων (X_i, Y_i) στο πλέγμα των οποίων οι ακριβείς συντεταγμένες (X'_i, Y'_i) είναι γνωστές.



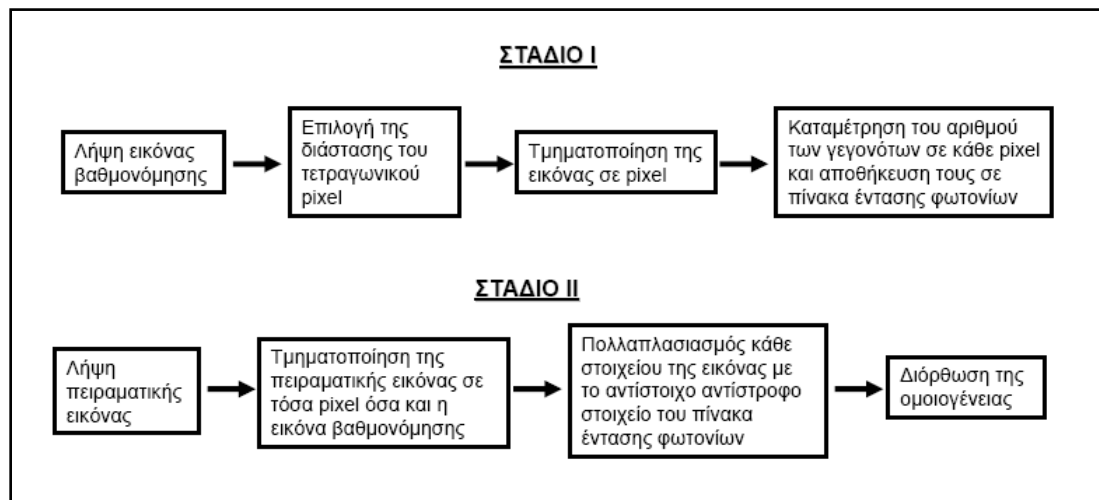
Σχήμα 5.5: Διορθωμένη προβολική εικόνα μετά από εφαρμογή του αλγορίθμου διόρθωσης στα δεδομένα της εικόνας του Σχήματος 5.2.

Για την εφαρμογή της μεθόδου αναπτύχθηκε αλγόριθμος σε FORTRAN, ο οποίος διορθώνει offline και event-by-event τις συντεταγμένες όλων των πειραματικά μετρούμενων σημείων και αποθηκεύει σε αρχείο τις αντίστοιχες διορθωμένες τιμές τους. Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόστηκε στα δεδομένα της εικόνας βαθμονόμησης (Σχήμα 5.2) και η αντίστοιχη διορθωμένη εικόνα φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε εξάλειψη της βαρελοειδούς παραμόρφωσης και εμφανή βελτίωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας. Πέραν των πλεονεκτημάτων αυτών θα πρέπει να τονισθεί πως η λαμβανομένη προβολική εικόνα δίδεται σε πραγματικές διαστάσεις, πράγμα που φαίνεται από την βαθμονόμηση των αξόνων σε mm.

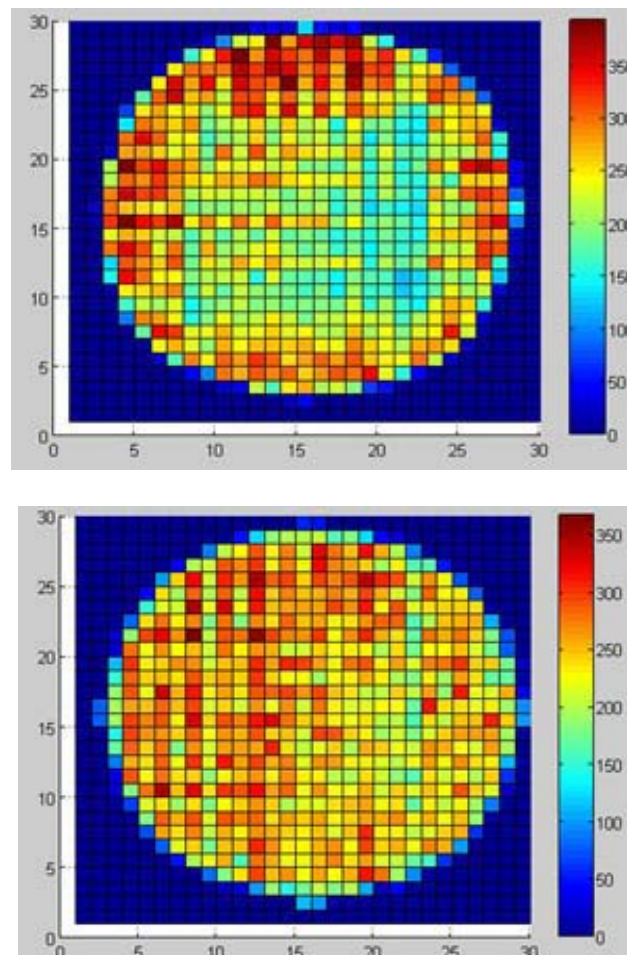
5.2 Μέθοδος διόρθωσης της ανομοιογένειας

Ένα επιπλέον πρόβλημα που παρατηρείται στα συστήματα γ-Κάμερα μικρού οπτικού πεδίου είναι η έλλειψη ομοιογένειας [JOH96], [PAN97], [JEO04], [CIN03]. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν σε μια εικόνα παραγόμενη από ομοιόμορφη ακτινοβόληση, (είτε χρησιμοποιώντας σημειακή πηγή τοποθετημένη σε μεγάλη απόσταση είτε επίπεδη πηγή τοποθετημένη σε πολύ μικρή απόσταση από τον κρύσταλλο-σπινθηριστή) και χωρίς τη χρήση κατευθυντήρα, εμφανίζονται περιοχές με διαφορετικό αριθμό έντασης φωτονίων ανά μονάδα επιφάνειας. Σε ένα ιδανικό σύστημα αναμένεται η ένταση αυτή να παρουσιάζει μόνο την επιτρεπόμενη στατιστική απόκλιση από τον μέσο όρο και να μην εξαρτάται από τη θέση του επιπέδου. Το πρόβλημα αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί κατά την κλινική εφαρμογή ενός συστήματος μπορεί να είναι η αιτία της εμφάνισης ψευδών είτε θερμών είτε ψυχρών περιοχών. Η επίλυση του προβλήματος της παρατηρούμενης ανομοιογένειας στην προβολική εικόνα είναι κατά συνέπεια άκρως σημαντική.

Για το σκοπό αυτό στα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των Σχημάτων 5.2 και 5.5 τα οποία προέρχονται ύστερα από ομοιόμορφη ακτινοβόληση του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) από πηγή ^{60}Co . Η μέθοδος που ακολουθήθηκε [THA08], [THA09a], είναι η ίδια και για τις δύο εικόνες (και προφανώς για οποιαδήποτε άλλη (Σχήμα 5.6): Η εικόνα χωρίζεται σε τετραγωνικά pixels στα οποία καταμετράται ο αριθμός των καταγεγραμμένων φωτονίων από αυτά και αποθηκεύεται σε πίνακα NxN όπου N ο αριθμός των pixels κάθε διάστασης. Η διάσταση καθενός pixel δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την διακριτική ικανότητα του συστήματος γιατί μπορεί να υποβαθμιστεί η διακριτική του ικανότητα μετά την διόρθωση της ομοιογένειας. Από την άλλη, δεν μπορεί να είναι και πάρα πολύ μικρή γιατί θα είναι χαμηλή η στατιστική κάθε pixel. Άρα το ιδανικό μέγεθος είναι λίγο μικρότερο από τη διακριτική ικανότητα του συστήματος με όσο το δυνατόν καλύτερη στατιστική.



Σχήμα 5.6: Αλγόριθμος διόρθωσης της ανομοιογένειας των προβολικών εικόνων.



Σχήμα 5.7: Μετρήσεις της έντασης I των φωτονίων (αποθηκευμένες σε 30x30 πίνακα) της χωρικά αδιόρθωτης (πάνω) και διορθωμένης (κάτω) προβολικής εικόνας των Σχημάτων 5.2 και 5.5 αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 5.7 παρατηρούμε τον πίνακα της έντασης των φωτονίων των Σχημάτων 5.2 και 5.5. Υπολογίζοντας το λόγο της ελάχιστης προς τη μέγιστη ένταση φωτονίων I_{\min}/I_{\max} έχουμε

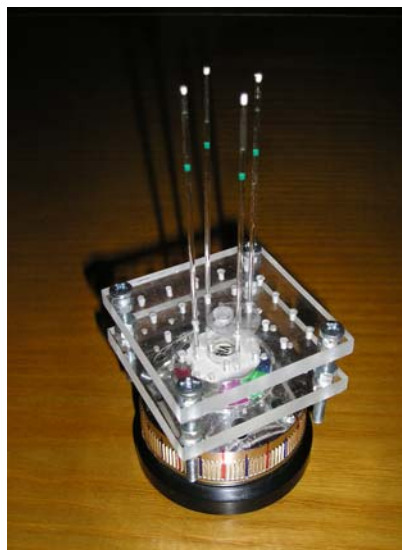
μια ποσοτική ένδειξη της ανομοιογένειας της εικόνας. Σε ένα ιδανικό σύστημα πρέπει ο λόγος αυτός να είναι ίσος με τη μονάδα σε οποιοδήποτε σημείο του οπτικού πεδίου. Όσο πιο μικρός είναι τόσο πιο ανομοιογενής είναι η προβολική εικόνα.

Υπολογίζουμε τον λόγο I_{\min}/I_{\max} και βρίσκουμε ότι είναι 0.33 και 0.44 της χωρικά αδιόρθωτης (Σχήμα 5.7 πάνω) και χωρικά διορθωμένης (Σχήμα 5.7 κάτω) προβολικής εικόνας αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι με την διόρθωση της βαρελοειδούς χωρικής παραμόρφωσης η ανομοιογένεια διορθώθηκε εν μέρει (φαίνεται και από οπτική παρατήρηση) αλλά όχι εντελώς. Δηλαδή παρατηρείται βελτίωση στην ομοιογένεια της τάξης του 25% μετά την διόρθωση της βαρελοειδούς παραμόρφωσης.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο και στις δύο εικόνες η ανομοιογένεια διορθώνεται και ο λόγος I_{\min}/I_{\max} γίνεται ίσος με τη μονάδα για κάθε pixel του οπτικού πεδίου του συστήματος. Η εφαρμογή και των δύο μεθόδων διόρθωσης (χωρικής παραμόρφωσης και ανομοιογένειας) σε πειραματικά δεδομένα περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

5.3 Εφαρμογή των μεθόδων διόρθωσης (χωρικής παραμόρφωσης και ανομοιογένειας) σε πειραματικά δεδομένα τύπου SPECT.

Για την εφαρμογή των μεθόδων διόρθωσης (χωρικής παραμόρφωσης και ανομοιογένειας) σε πειραματικά δεδομένα SPECT [THA08], [THA09a], ελήφθησαν δεδομένα (με τον διακριτοποιημένο κρύσταλλο CsI(Tl) και τον κατευθυντήρα) χρησιμοποιώντας το περιστρεφόμενο ομοίωμα το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα του Σχήματος 5.8. Το ομοίωμα αποτελείται από 4 κατακόρυφους τριχοειδείς σωλήνες (εξωτερικής διαμέτρου 1.2mm) τοποθετημένους πάνω σε περιστρεφόμενη γωνιομετρική βάση. Οι τριχοειδείς είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε να σχηματίζουν ορθογώνιο τετραγωνικό πρίσμα διαγωνίου βάσης 2cm και περιέχουν υδατικό διάλυμα ^{99m}Tc .

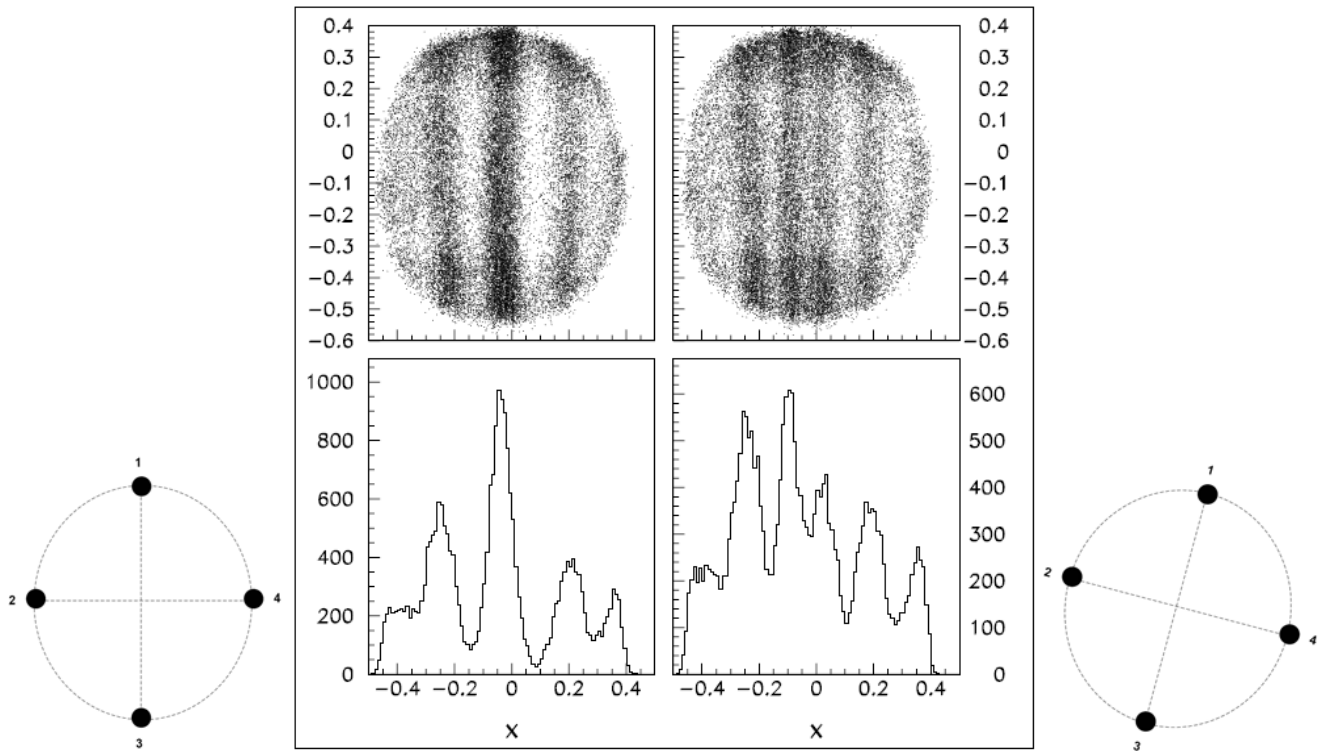


Σχήμα 5.8: Το περιστρεφόμενο ομοίωμα των 4 τριχοειδών.

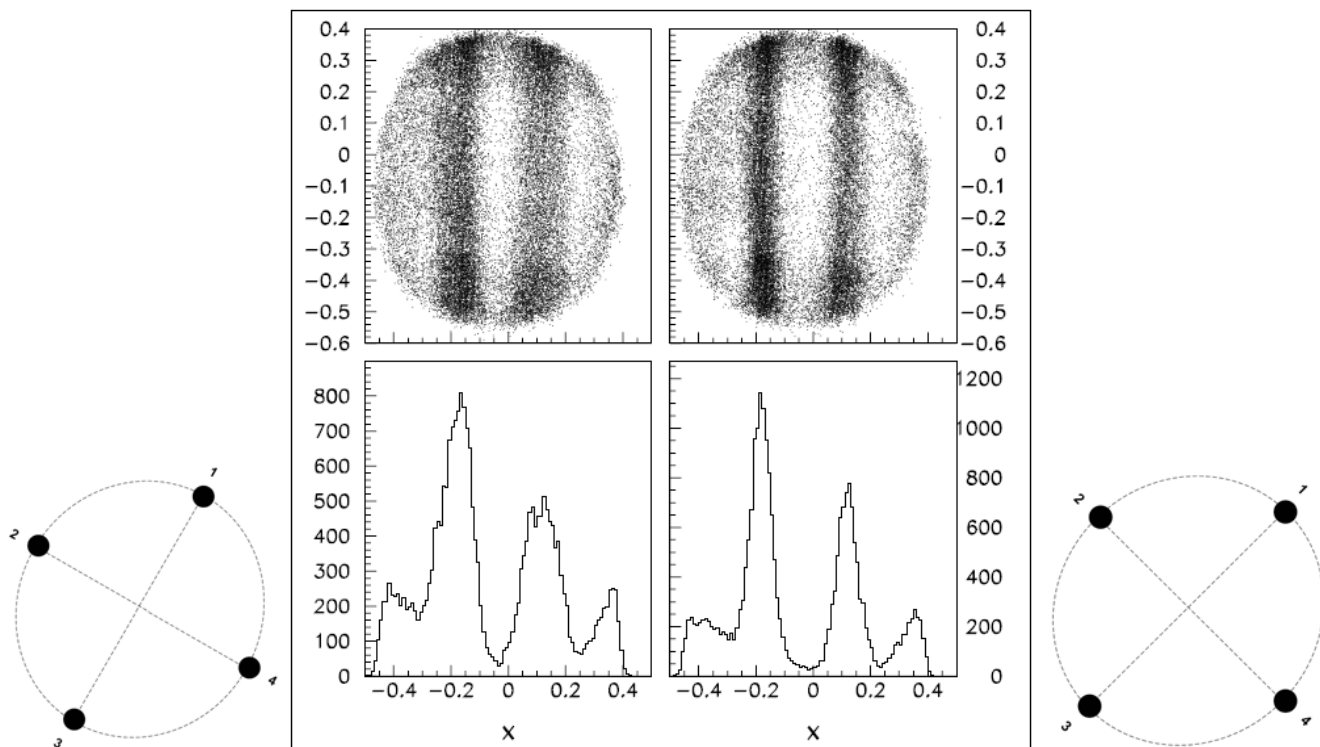
Για την εκτέλεση του πειράματος η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Κατά την εκτέλεση του πειράματος ελήφθησαν 12 προβολικές εικόνες σε βήματα των 15° . Στα Σχήματα 5.9-5.14 φαίνονται οι δισδιάστατες προβολικές εικόνες μαζί με τις προβολές τους κατά τον x-άξονα, που ελήφθησαν ανά 15° , μετά το φιλτράρισμα των χαμηλο-ενεργειακών φωτονίων. Στις προβολικές εικόνες παρατηρούμε τα σωληνοειδή αλλού έντονα όταν οι προβολές τους επικαλύπτονται και αλλού λιγότερο έντονα όταν δεν συμβαίνει αυτό. Στις μονοδιάστατες προβολές παρατηρούμε ότι βλέπουμε είτε δύο είτε τρεις κορφές αλλά όχι τέσσερις (η χαμηλή κορφή στο 0.3 είναι υπόβαθρο όπως μπορούμε να δούμε και από τις αντίστοιχες δισδιάστατες εικόνες) και αυτό προφανώς εξαρτάται από τη γωνία λήψης των δεδομένων. Για να ανακατασκευάσουμε τα τομογραφικά επίπεδα των σωληνοειδών χωρίζουμε τις προβολικές τους εικόνες σε τόσες ζώνες όσες οι τομές που θέλουμε να ανακατασκευάσουμε. Όσο περισσότερες είναι οι τομές τόσο καλύτερη θα είναι η χωρική διακριτική ικανότητα της ανακατασκευής αλλά τόσο χαμηλότερη η στατιστική του αριθμού των καταγεγραμμένων γεγονότων, φαινόμενο που οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας. Άρα για την σωστή ανακατασκευή επιζητείται η χρυσή τομή μεταξύ της διακριτικής ικανότητας και της επαρκούς στατιστικής. Μετά από διαφορετικές ανακατασκευές μεταβάλλοντας τον αριθμό των τομογραφικών επιπέδων παρατηρήθηκε ότι για 10 επίπεδα συνδυάζεται και υψηλή διακριτική ικανότητα και καλή στατιστική.



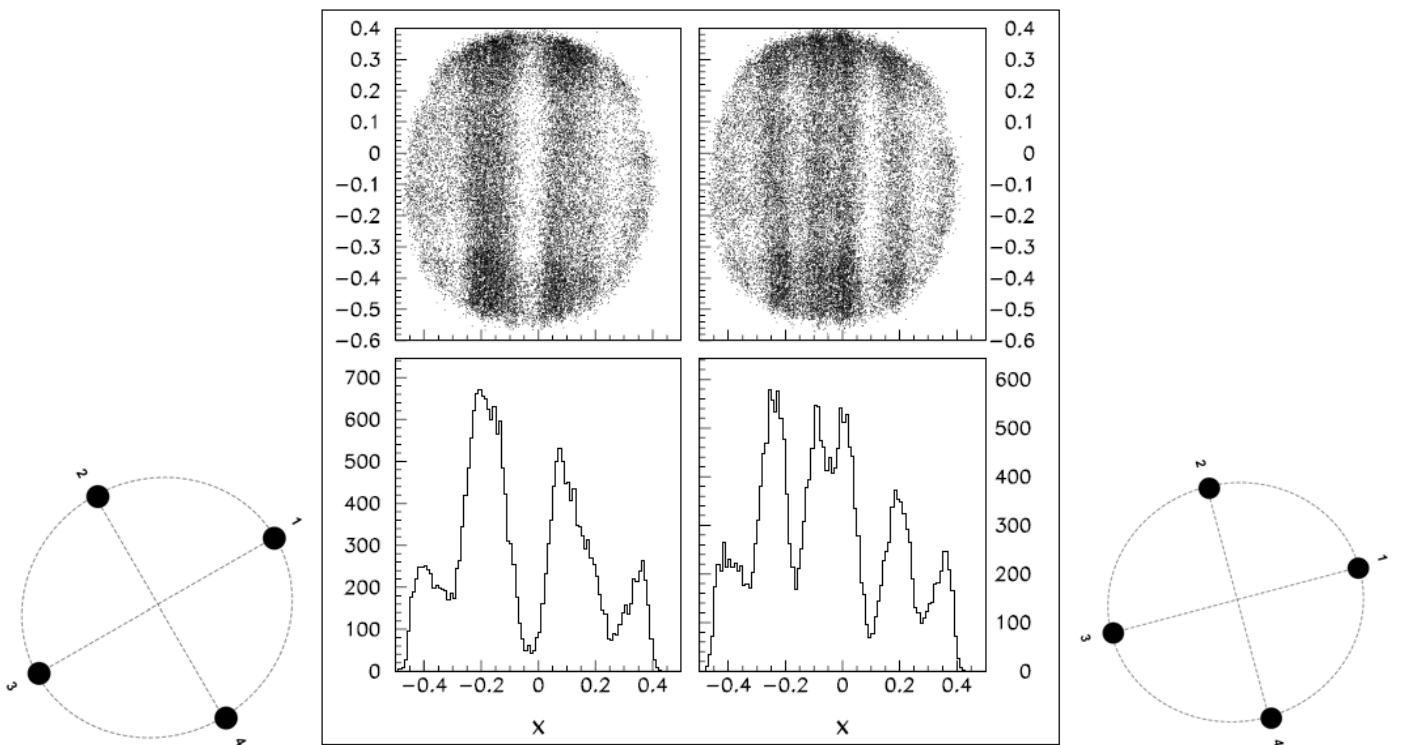
Σχήμα 5.9: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά το πείραμα.



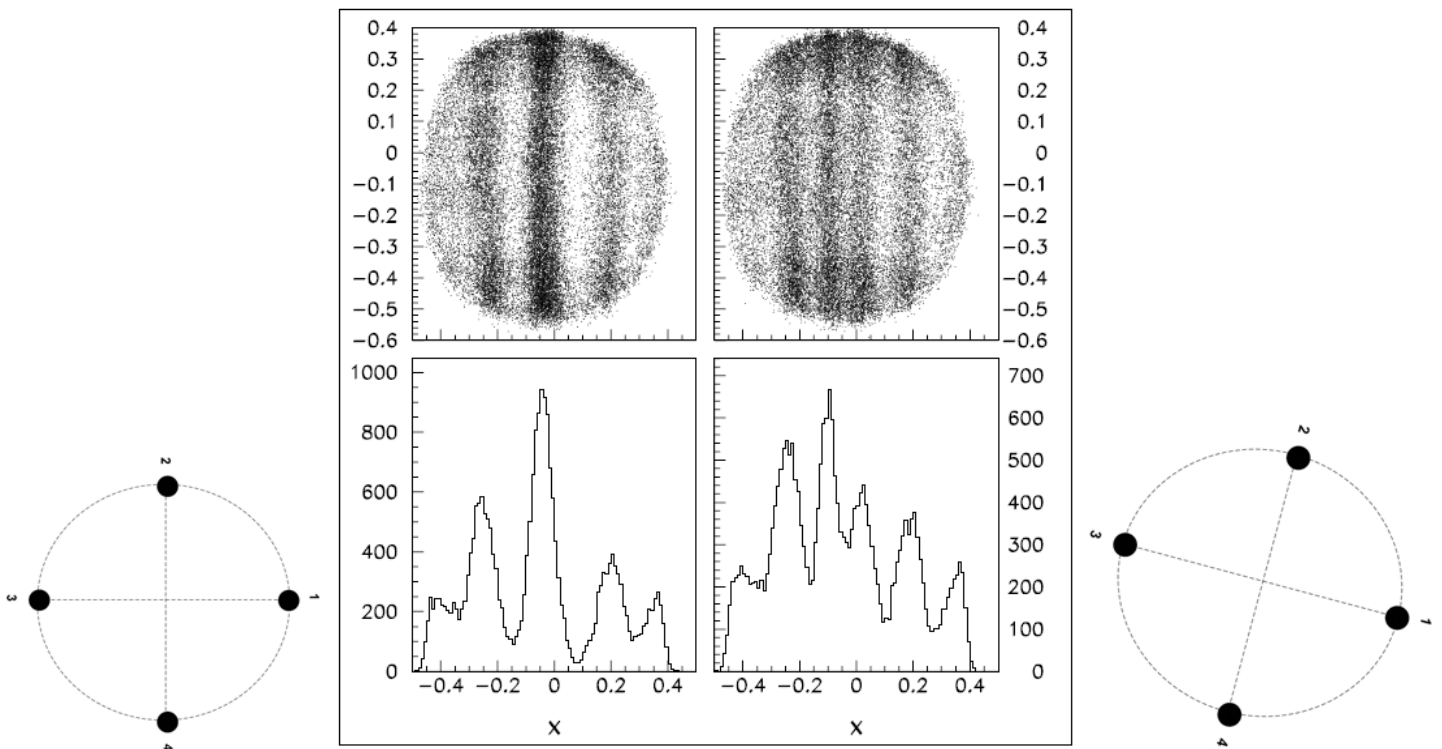
Σχήμα 5.10: Προβολικές εικόνες του ομοιώματος για γωνίες απεικόνισης 0° (αριστερά) και 15° (δεξιά).



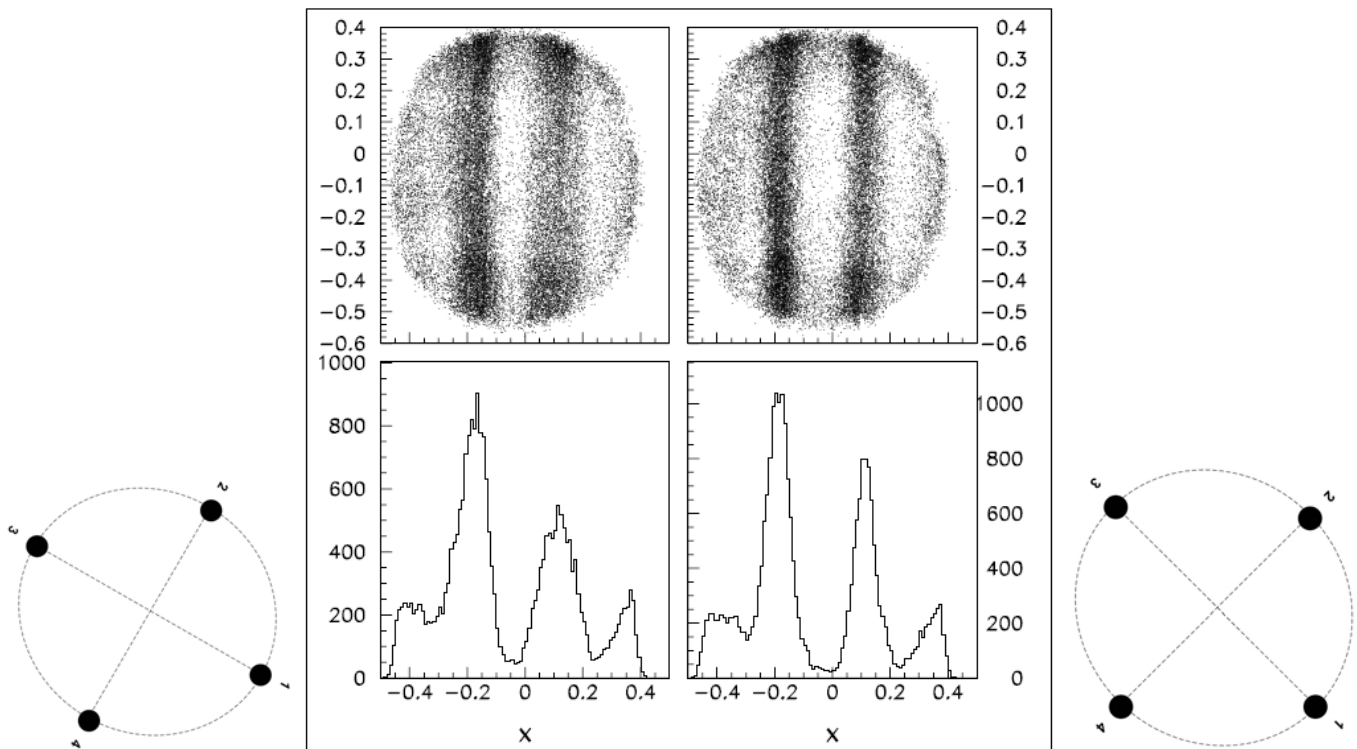
Σχήμα 5.11: Προβολικές εικόνες του ομοιώματος για γωνίες απεικόνισης 30° (αριστερά) και 45° (δεξιά).



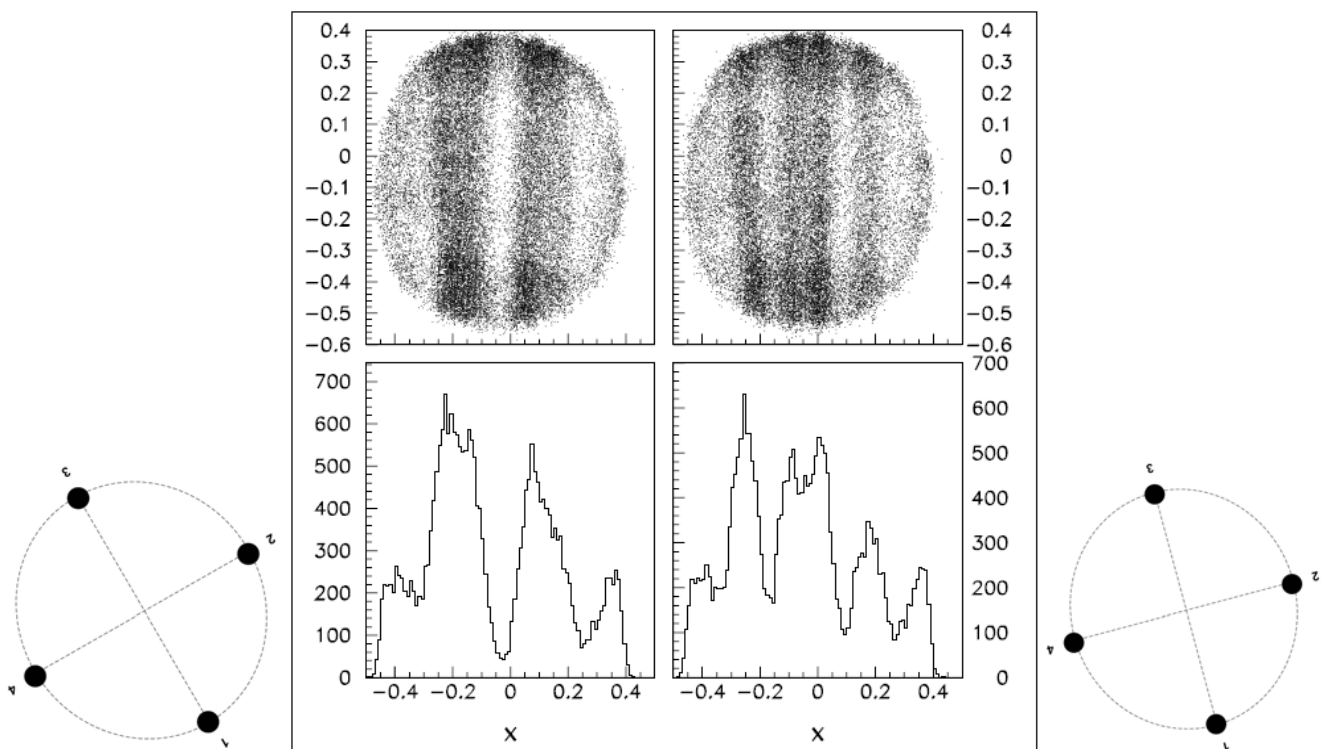
Σχήμα 5.12: Προβολικές εικόνες του ομοιώματος για γωνίες απεικόνισης 60° (αριστερά) και 75° (δεξιά).



Σχήμα 5.13: Προβολικές εικόνες του ομοιώματος για γωνίες απεικόνισης 90° (αριστερά) και 105° (δεξιά).



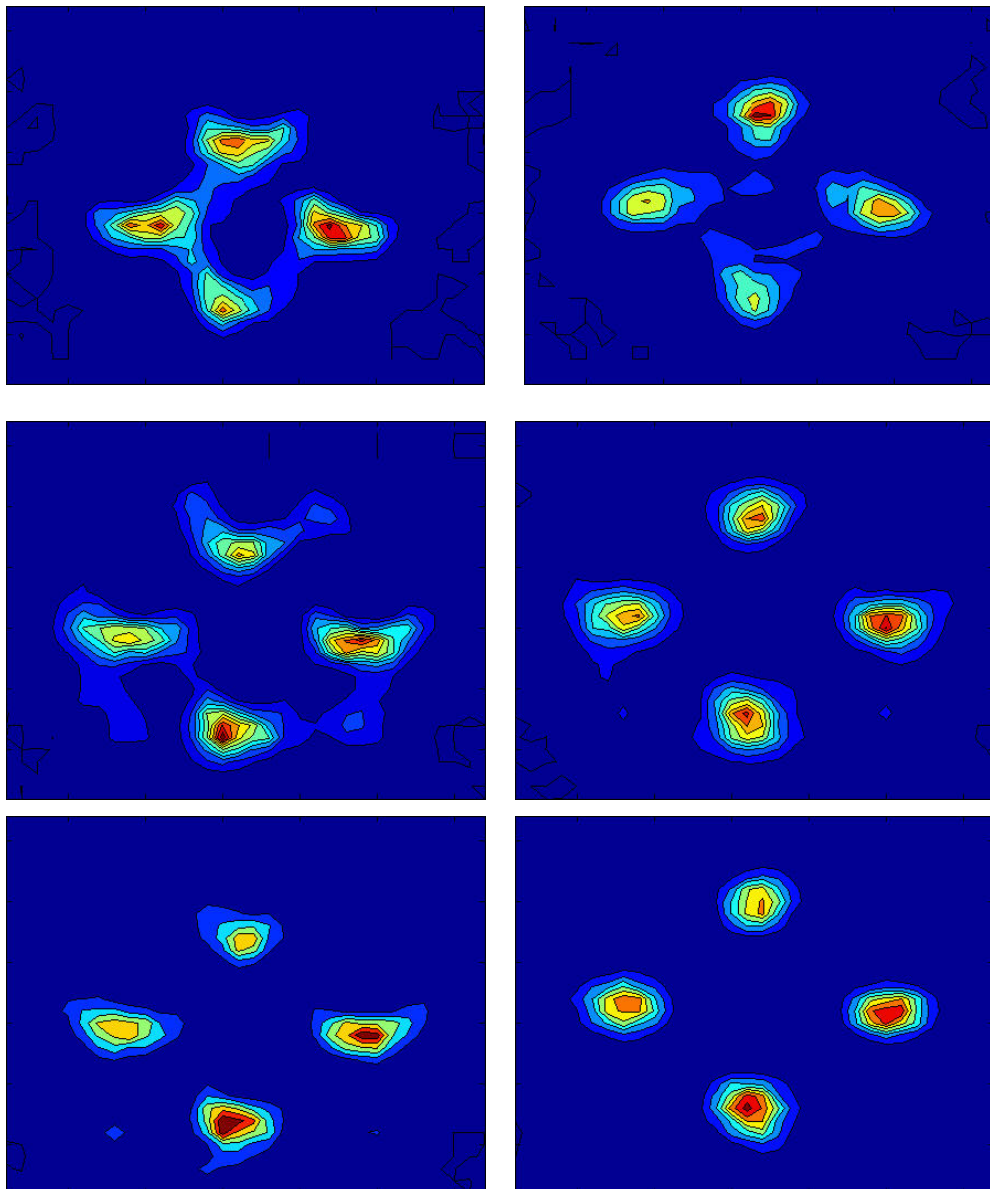
Σχήμα 5.14: Προβολικές εικόνες του ομοιώματος για γωνίες απεικόνισης 120° (αριστερά) και 135°(δεξιά).



Σχήμα 5.15: Προβολικές εικόνες του ομοιώματος για γωνίες απεικόνισης 150° (αριστερά) και 165°(δεξιά).

Ανακατασκευάστηκαν τα προβολικά επίπεδα χρησιμοποιώντας τον επαναληπτικό αλγόριθμο ανακατασκευής MLEM (Maximum Likelihood Expectation Maximization)

[PRE95]. Ο αλγόριθμος αυτός ενσωματώνει, εκτός από αναλυτικές, και φυσικές διεργασίες στη διαδικασία της ανακατασκευής. Το βασικό του χαρακτηριστικό έχει πως λαμβάνει υπόψη τη στατιστική φύση της εκπομπής ακτινοβολίας από μία πηγή και βασίζεται στο ότι η εκπομπή της ακτινοβολίας ακολουθεί κατανομή Poisson και για να επιλύσει το πρόβλημα της ανακατασκευής. Ξεκινάει λοιπόν από μία ομοιόμορφη εικόνα και στη συνέχεια βρίσκει τον κατάλληλο συντελεστή λ (της κατανομής Poisson) για τον οποίο μετά από κάθε επανάληψη ο λογάριθμος της πιθανότητας μεγιστοποιείται. Με τον τρόπο αυτό παράγει αποτελέσματα (δηλαδή εικόνες) μεγαλύτερης ακρίβειας και μικρότερου θορύβου από ότι άλλες αναλυτικές μέθοδοι ανακατασκευής.



Σχήμα 5.16: Ανακατασκευασμένα τομογραφικά επίπεδα των 4 τριχοειδών σε ύψος 20mm (πάνω), 15mm (μέση) και 0mm (κάτω) από το κέντρο του οπτικού πεδίου του συστήματος πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή των μεθόδων διόρθωσης στα δεδομένα των προβολικών εικόνων.

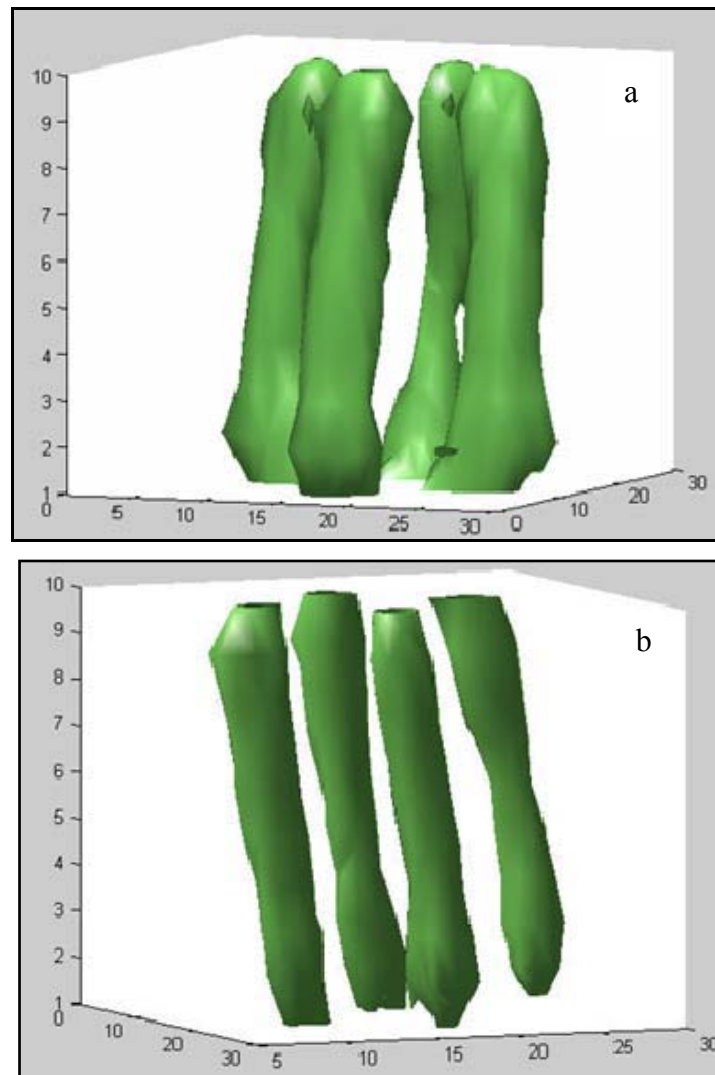
Για την ανακατασκευή των τομογραφικών επιπέδων, για μια συγκεκριμένη ζώνη δεδομένων, χωρίζουμε τις μονοδιάστατες προβολές σε 32 bins (δηλαδή 32 ακτίνες) και καταγράφουμε τις 32 αυτές τιμές σε αρχείο. Συνολικά το αρχείο περιέχει 12 (αριθμός γωνιών) x 32 (αριθμός bins) = 384 αριθμούς. Ο αλγόριθμος ανακατασκευής MLEM χρησιμοποιεί τα δεδομένα αυτά για να ανακατασκευάσει το τομογραφικό επίπεδο, παράγοντας ένα δισδιάστατο πίνακα δεδομένων 32 x 32. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για κάθε ζώνη δεδομένων, με αποτέλεσμα την παραγωγή N δισδιάστατων πινάκων, όπου N ο συνολικός αριθμός των ζωνών – τομογραφικών επιπέδων. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος διόρθωσης χωρικής παραμόρφωσης και ανομοιογένειας στα δεδομένα των προβολικών εικόνων και ανακατασκευάστηκαν πάλι τα τομογραφικά επίπεδα με σκοπό τη σύγκριση τους με τα αντίστοιχα επίπεδα που βασίζονται σε μη διορθωμένα δεδομένα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες του Σχήματος 5.16.

Στις εικόνες αυτές παρατηρείται σημαντική βελτίωση στην απεικόνιση των τεσσάρων τριχοειδών όταν βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το κέντρο του οπτικού πεδίου, γιατί όπως αναφέρθηκε η χωρική παραμόρφωση είναι έντονη κοντά στην περιφέρεια του οπτικού πεδίου, ενώ όταν βρίσκονται κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των διορθωμένων και μη δεδομένων γιατί η χωρική παραμόρφωση είναι αμελητέα στις περιοχές αυτές. Μετρήθηκε η χωρική διακριτική ικανότητα των τομογραφικών επιπέδων, διορθωμένων και μη, δεδομένων, σε δύο περιοχές του οπτικού πεδίου, κεντρική και περιφερειακή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.1 από τα οποία παρατηρείται ότι, όπως αναμένεται, στις περιφερειακές περιοχές η διακριτική ικανότητα είναι χειρότερη από ότι στις κεντρικές περιοχές και ότι εφαρμόζοντας τη μέθοδο διόρθωσης η διακριτική ικανότητα βελτιώνεται. Πάντως σε κάθε περίπτωση είναι καλύτερη των 2mm τιμή που είναι καλύτερη των εμπορικών συστημάτων μεγάλου οπτικού πεδίου (~3mm).

	Χωρίς διόρθωση	Με διόρθωση
Κεντρική περιοχή	(1.5±0.2)mm	(1.4±0.1)mm
Περιφερειακή περιοχή	(2.0±0.3)mm	(1.7±0.2)mm

Πίνακας 5.1: Τομογραφική διακριτική ικανότητα για 2 περιοχές του οπτικού πεδίου (κεντρική και περιφερειακή) με και χωρίς διόρθωση της βαρελοειδούς παραμόρφωσης.

Στο Σχήμα 5.17 απεικονίζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση των τριχοειδών, χρησιμοποιώντας όλα τα τομογραφικά επίπεδα. Παρατηρείται ότι χωρίς τη χρήση των μεθόδων διόρθωσης τα τριχοειδή φαίνονται καμπυλωμένα στα όρια του οπτικού πεδίου εξαιτίας της έντονης παρουσίας της βαρελοειδούς παραμόρφωσης ενώ με τη χρήση των μεθόδων ανακατασκευής η γραμμικότητα των τριχοειδών έχει αποκατασταθεί.



Σχήμα 5.17: Τρισδιάστατη αναπαράσταση των τεσσάρων τριχοειδών χρησιμοποιώντας δεδομένα βασισμένα στα (a) αδιόρθωτα και (b) διορθωμένα τομογραφικά επίπεδα.

Συνοψίζοντας αναφέρουμε ότι οι μέθοδοι διόρθωσης της χωρικής παραμόρφωσης και της ομοιογένειας εφαρμόστηκαν με επιτυχία στην περίπτωση διακριτοποιημένων κρυστάλλων χρησιμοποιώντας δεδομένα από την εικόνα βαθμονόμησης και συνθέτοντας τον πίνακα διόρθωσης. Σε περίπτωση που ο κρύσταλλος δεν στραφεί (σχετικά με τον φωτοπολλαπλασιαστή) ο πίνακας διόρθωσης δεν αλλάζει από πείραμα σε πείραμα. Μόνο μετά από στροφή του κρυστάλλου είναι απαραίτητη η λήψη νέας εικόνας βαθμονόμησης και εξαγωγή του πίνακα διόρθωσης από αυτήν. Επίσης η διόρθωση γίνεται offline οπότε δεν καθυστερείται ο ρυθμός λήψης δεδομένων από το σύστημα. Η βελτίωση τόσο των διορθωμένων προβολικών εικόνων όσο και των τομογραφικών επιπέδων είναι εμφανής και η διακριτική τους ικανότητα βελτιώνει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Βελτιστοποίηση της Ανακατασκευής Θέσης σε Προβολικές Εικόνες

Πολυανοδικών Συστημάτων γ-Κάμερα με Διαιρέτη Φορτίου

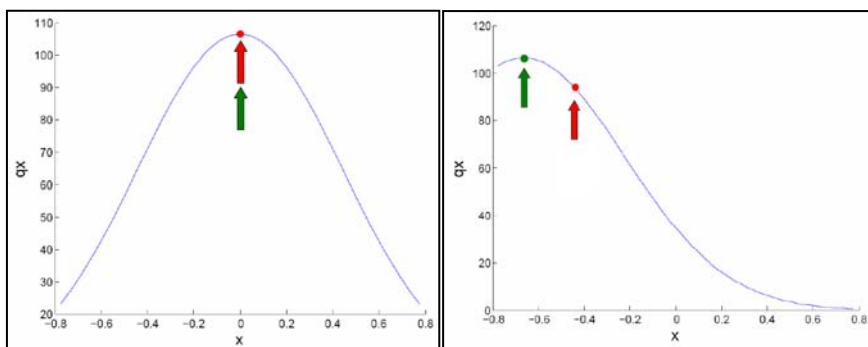
6.1 Εισαγωγή

Η ανακατασκευή της θέσης σε συστήματα γ-Κάμερα μικρού οπτικού πεδίου στα οποία δεν εφαρμόζεται διαίρεση φορτίου στα εξερχόμενα σήματα είναι γνωστό ότι γίνεται με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους (center of gravity, COG), ο οποίος περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$X_{COG} = \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot qx_i}{\sum_{i=1}^N qx_i}, \quad Y_{COG} = \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot qy_i}{\sum_{i=1}^N qy_i} \quad (6.1)$$

όπου i ο αύξων αριθμός του καλωδίου και qx_i (ή qy_i) η τιμή του (δηλαδή το φορτίο του αντίστοιχου καλωδίου). Με τον τρόπο αυτό τα (X_{COG}, Y_{COG}) λαμβάνουν συνεχείς τιμές μεταξύ του ελαχίστου και μεγίστου άξοντα αριθμού καλωδίου (i) και χρησιμοποιούνται ως πρωτογενής πληροφορία θέσης στην προβολική λήψη.

Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει κάποια προβλήματα, όπως μέτρηση ελαττωμένου φορτίου (κυρίως στα άκρα του οπτικού πεδίου) με αποτέλεσμα να εμφανίζονται χωρικές παραμορφώσεις στις παραγόμενες προβολικές εικόνες. Στο κεφάλαιο 5 αναπτύχθηκε και περιγράφηκε ένας τρόπος διόρθωσης των παραμορφώσεων αυτών (στην περίπτωση των διακριτοποιημένων κρυστάλλων) κάνοντας χρήση της γνωστής ονομαστικής τιμής για κάθε θέση του pixel του διακριτοποιημένου κρυστάλλου. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτυχθεί ένας νέος αλγόριθμος ανακατασκευής της θέσης όπου γίνεται προσπάθεια παραμερισμού του προβλήματος του ελλείποντος φορτίου στις οριακές περιοχές του οπτικού πεδίου με αποτέλεσμα την βελτίωση της παραγόμενης προβολικής εικόνας [THA09b]. Παρόμοιες προσπάθειες για βελτίωση της ανακατασκευής της θέσης έχουν γίνει από διάφορες ερευνητικές ομάδες [ANT02], [SCA03], [LIN07], [LER09a].



Σχήμα 6.1: Κατανομή φορτίου παραγόμενη από γ-φωτόνιο που προσπίπτει στο κέντρο (αριστερά) και στην άκρη (δεξιά) του οπτικού πεδίου. Με πράσινο είναι η ονομαστική και με κόκκινο η ανακατασκευαζόμενη, με τον αλγόριθμο διαίρεσης φορτίου, θέση πρόσπτωσης του γ-φωτονίου.

Στο Σχήμα 6.1 παρατηρούμε την κατανομή του φορτίου που παράγεται από ένα προσπίπτον γ -φωτόνιο στο κέντρο του οπτικού πεδίου του συστήματος (αριστερά) και στα άκρα του (δεξιά).

Εύκολα καταλαβαίνουμε ότι η θέση του μεγίστου φορτίου καθορίζει και την ονομαστική θέση πρόσπτωσης του φωτονίου στο οπτικό πεδίο. Παρατηρούμε ότι η ανακατασκευασμένη θέση του φωτονίου με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους (κόκκινο βέλος) ταυτίζεται με την ονομαστική του θέση (πράσινο βέλος) μόνο στην περίπτωση που το φωτόνιο προσπέσει στην κεντρική περιοχή του οπτικού πεδίου δεδομένου ότι το ελλείπον φορτίο είναι μηδενικό και ο αλγόριθμος «ζυγίζει» σωστά. Αυτό όμως αποτελεί μια ειδική, ιδανική περίπτωση που δυστυχώς στην πράξη συμβαίνει ελάχιστες φορές, με αποτέλεσμα η ανακατασκευασμένη θέση να μην ταυτίζεται με την ονομαστική της αντίστοιχη θέση. Συνεπώς η ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου ανακατασκευής της θέσης με την οποία δεν θα εμφανίζεται το παραπάνω φαινόμενο είναι αναγκαία. Στο κεφάλαιο αυτό θα προταθεί και θα αναπτυχθεί ένας νέος αλγόριθμος ανακατασκευής της θέσης με τη βοήθεια του οποίου θα προσπαθήσουμε να παραμερίζουμε τα προβλήματα αυτά.

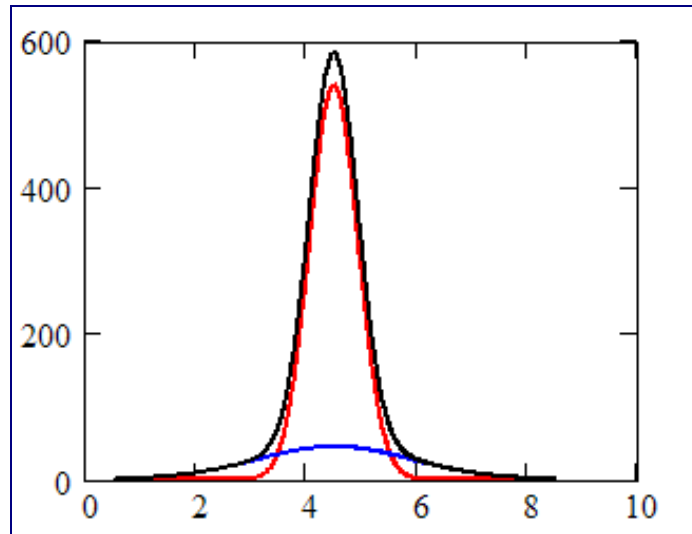
6.2 Περιγραφή του μοντέλου

Το νέο προτεινόμενο μοντέλο περιγράφει, με απλό τρόπο, την κατανομή του νέφους των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στο ανοδικό πλέγμα του PSPMT [MIK08]. Παρόμοιες προσπάθειες έχουν γίνει που όμως χρησιμοποιούν περίπλοκα και δύσχρηστα μοντέλα της κατανομής του φωτός [CIO09], [DHA05], [LER05], [LER09a], [SCA04]. Με το μοντέλο που θα περιγραφεί παρακάτω θα βασιστεί η μέθοδος της βελτιωμένης ανακατασκευής της θέσης των προσπιπτόντων γ -φωτονίων στον κρύσταλλο-σπινθηριστή. Σύμφωνα με το μοντέλο, στο καθοδικό πλέγμα προσπίπτει νέφος οπτικών φωτονίων που μπορεί να περιγραφεί από μια γκαουσιανή κατανομή G η οποία προκύπτει από το άθροισμα δυο επιμέρους γκαουσιανών κατανομών G_1 και G_2 . Η παραδοχή αυτή στηρίζεται σε οπτικές προσομοιώσεις διάδοσης του φωτός στον κρύσταλλο σπινθηριστή, όπου φαίνονται ότι η κατανομή των οπτικών φωτονίων μπορεί σε μια γενική περίπτωση να εκφραστεί από την υπέρθεση δύο κανονικών κατανομών [MIK10]. Οι μαθηματικές σχέσεις των κατανομών αυτών φαίνονται παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 G(P_x, P_y, x, y) &= G_1(P_x, P_y, x, y) + G_2(P_x, P_y, x, y) \\
 G_1(P_x, P_y, x, y) &= A_1 e^{-\frac{(x-P_x)^2 + (y-P_y)^2}{2s_1^2}} \\
 G_2(P_x, P_y, x, y) &= A_2 e^{-\frac{(x-P_x)^2 + (y-P_y)^2}{2s_2^2}}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Το σημείο (P_x, P_y) αναφέρεται στις συντεταγμένες πρόσπτωσης νέφους στο ανοδικό πλέγμα του PSPMT, ενώ τα (x, y) είναι οι ελεύθεροι παράμετροι της κατανομής G . Οι

παράμετροι (A_1, s_1) και (A_2, s_2) είναι οι εντάσεις και τα εύρη των γκαουσιανών G_1 και G_2 αντίστοιχα. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών εξαρτώνται τόσο από το είδος όσο και από το πάχος του κρυστάλλου-σπινθηριστή που χρησιμοποιείται αλλά και από την ενέργεια του προσπίπτοντος γ -φωτονίου. Οπτικές προσομοιώσεις που έχουν γίνει [POL09] έδειξαν ότι όταν χρησιμοποιείται διακριτοποιημένος κρύσταλλος-σπινθηριστής οι δύο γκαουσιανές είναι απαραίτητες ενώ όταν χρησιμοποιείται ομογενής κρύσταλλος η μια γκαουσιανή αρκεί. Για την καλύτερη κατανόηση, ένα παράδειγμα κατανομής του ηλεκτρονικού νέφους και της χρήσης του αθροίσματος δύο γκαουσιανών φαίνεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Μονοδιάστατη κατανομή ηλεκτρονικού νέφους και εφαρμογή του αθροίσματος των δύο γκαουσιανών κατανομών για την βέλτιστη περιγραφή του.

Το συλλεγόμενο φορτίο σε συγκεκριμένο i από τα N καλώδια του ανοδικού πλέγματος υπολογίζεται μετά την ολοκλήρωση του ανοδικού φορτίου κατά μήκος του καλωδίου αυτού. Θεωρώντας πως ο συντελεστής k ο οποίος περιγράφει την ενίσχυση των φωτοηλεκτρονίων στον φωτοπολλαπλασιαστή, παραμένει, σε όλη την ενεργή επιφάνεια, σταθερός τότε το συλλεγόμενο φορτίο q_x κατά μήκος του άξονα x ή το q_y κατά μήκος του άξονα y θα δίδεται από τις σχέσεις:

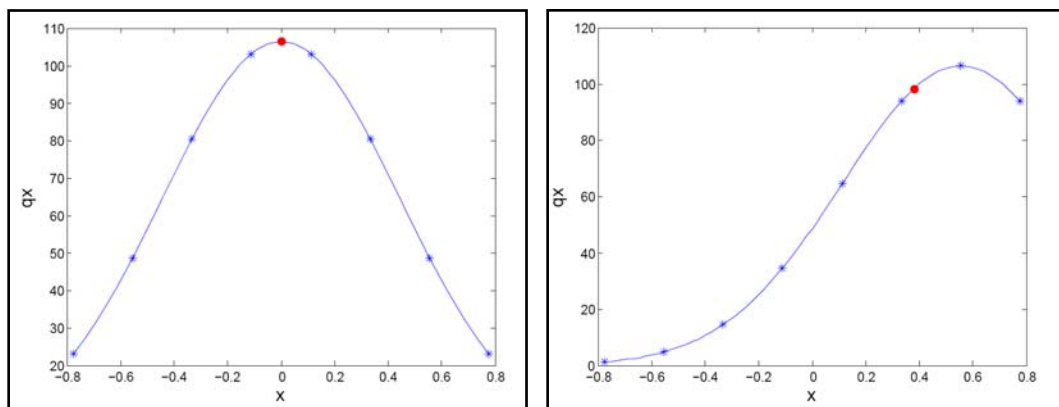
$$q_{x_i} = k \int_{y_1}^{y_2} G(P_x, P_y, i, y) dy \quad q_{y_i} = k \int_{x_1}^{x_2} G(P_x, P_y, x, i) dx \quad (6.3)$$

ενώ το συνολικό φορτίο Q :

$$Q = \sum_{i=1}^N (q_{x_i} + q_{y_j}) \quad (6.4)$$

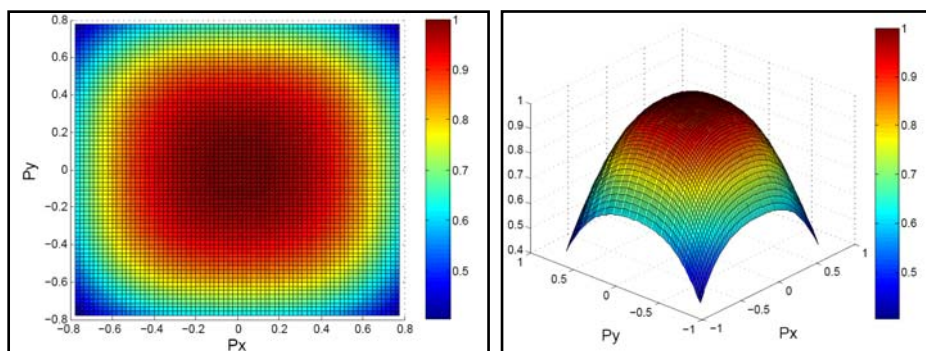
Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζονται οι κατανομές του φορτίου στον x -άξονα που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιώντας παραμέτρους της γκαουσιανής G_1 (η G_2 θεωρήθηκε ίση με το μηδέν), $(A_1, s_1, P_x) = (100, 2, 0)$ (αριστερά) και $(A_1, s_1, P_x) = (100, 2,$

5/9) (δεξιά). Τα 8 μπλε σημεία είναι οι τιμές q_{x_i} που δίνει το μοντέλο στις θέσεις των 8 καλωδίων του ανοδικού πλέγματος του PSPMT ενώ το κόκκινο σημείο δείχνει την θέση που προκύπτει εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους.



Σχήμα 6.3: Κατανομές του φορτίου στον x-άξονα που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου για τιμές των παραμέτρων $(A_1, s_1, P_x) = (100, 2, 0)$ (αριστερά) και $(A_1, s_1, P_x) = (100, 2, 5/9)$ (δεξιά). Τα 8 μπλε σημεία είναι οι τιμές q_{x_i} που δίνει το μοντέλο στις θέσεις των 8 καλωδίων του ανοδικού πλέγματος του PSPMT ενώ το κόκκινο σημείο δείχνει τον προσδιορισμό της θέσης που προκύπτει εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο κέντρου βάρους.

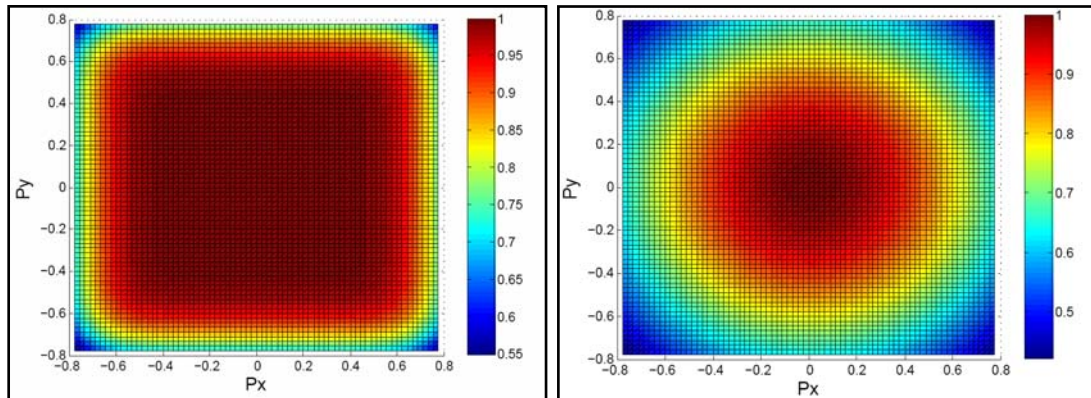
Ακολουθεί ο υπολογισμός του ολικού φορτίου Q , ο οποίος αναπαρίσταται στο Σχήμα 6.4, ομογενή κρυστάλλου (για το λόγο αυτό θεωρούμε $G_2=0$) εφαρμόζοντας την σχέση 6.4 για τις διάφορες συντεταγμένες (P_x, P_y) πρόσπτωσης των γ -φωτονίων στον κρύσταλλο-σπινθηριστή και τιμής παραμέτρου $s_1=1.5$ (η παράμετρος A_1 δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα γιατί τα δεδομένα είναι κανονικοποιημένα στο μέγιστο). Παρατηρείται μέτρηση ελλειμματικού φορτίου στα άκρα του οπτικού πεδίου του φωτοπολλαπλασιαστή η οποία φτάνει ως το 45%, περίπου, του μεγίστου το οποίο μετράται στο κέντρο του οπτικού πεδίου. Είναι προφανές ότι το ποσοστό αυτό εξαρτάται και από την παράμετρο s_1 της γκαουσιανής κατανομής και είναι χειρότερο (μεγαλύτερο) όσο η τιμή της s_1 μεγαλώνει.



Σχήμα 6.4: Υπολογισμός του ολικού φορτίου Q (κανονικοποιημένου στο μέγιστο) εφαρμόζοντας το μοντέλο (σχέση 6.4) για ομογενή κρύσταλλο παραμέτρου $s_1=1.5$ στο επίπεδο (P_x, P_y) .

Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 6.5 στο οποίο αναπαρίσταται το ολικό φορτίο Q που υπολογίζεται συναρτήσει σημείων του επιπέδου (P_x, P_y) για 2 διαφορετικές τιμές της παραμέτρου s_1 ($s_1=0.8$ και $s_1=2.5$). Το συστηματικό αυτό φαινόμενο μπορεί να

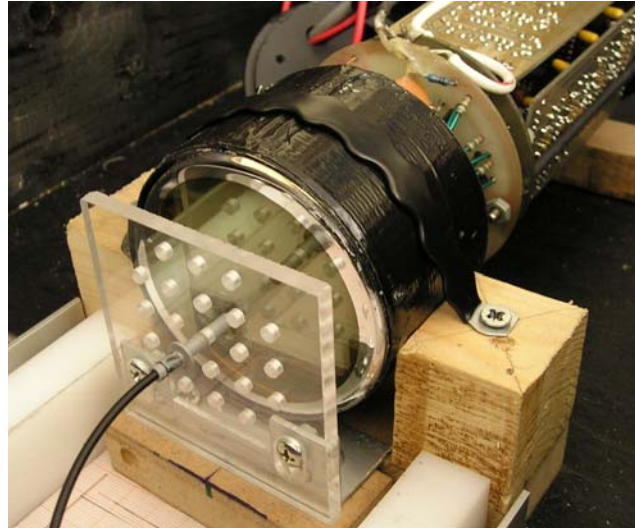
ποσοτικοποιηθεί και να υπολογιστεί από το προτεινόμενο μοντέλο και οφείλεται στο ότι ένα τμήμα της κατανομής του φορτίου ‘κόβεται’ στις περιφερειακές περιοχές του οπτικού πεδίου του PSPMT.



Σχήμα 6.5: Υπολογισμός του ολικού φορτίου Q (κανονικοποιημένου στο μέγιστο) εφαρμόζοντας το μοντέλο (εξίσωση 6.4) για ομογενή κρύσταλλο, παραμέτρου $s_1=0.8$ (αριστερά) και $s_1=2.5$ (δεξιά) στο επίπεδο (P_x, P_y) .

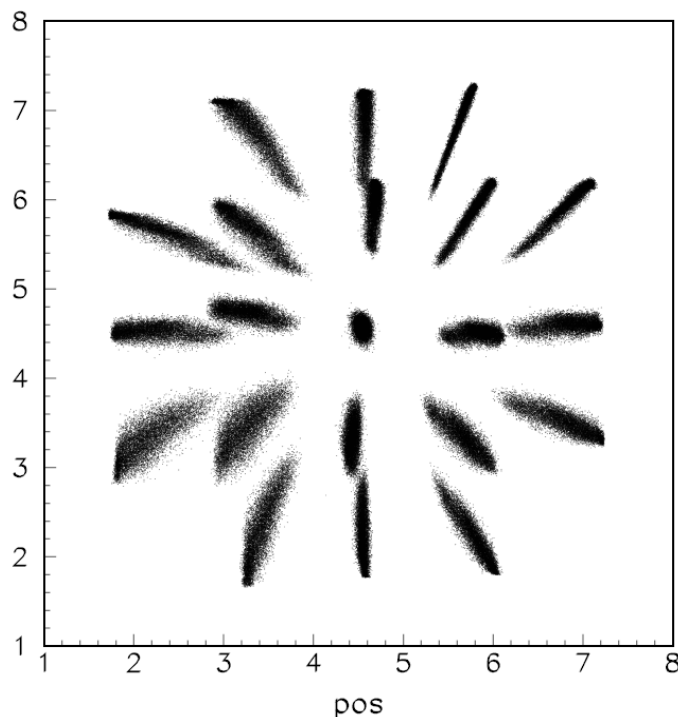
6.3 Εφαρμογή του μοντέλου σε πειραματικά δεδομένα

Για να επιβεβαιωθεί η ισχύς του μοντέλου γίνεται έλεγχος με πειραματικά δεδομένα τα οποία λαμβάνονται με τη βοήθεια ενός LED οπτικού φωτός το οποίο φωτίζει την επιφάνεια του PSPMT σε 21 ισαπέχοντα (ανά 10mm) σημεία με τη βοήθεια ενός πλέγματος στήριξης του LED. Η ακριβής διάταξη φαίνεται στην εικόνα του Σχήματος 6.6.



Σχήμα 6.6: Πειραματική διάταξη λήψης δεδομένων 21 ισαπεχόντων σημείων (ανά 10mm) με τη χρήση LED οπτικού φωτός και τη βοήθεια πλέγματος στήριξης.

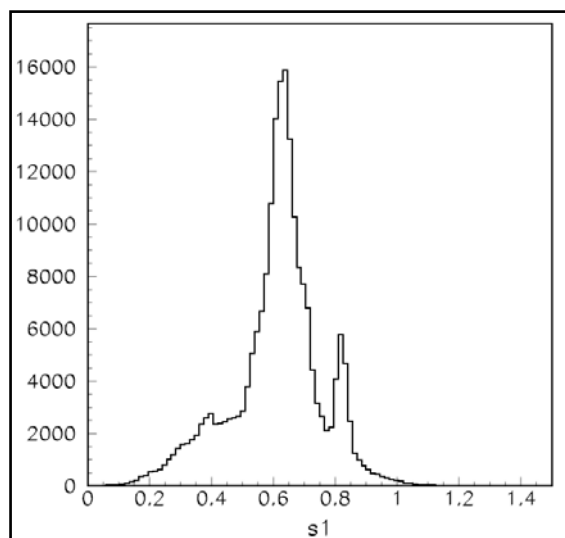
Αρχικά ανακατασκευάζουμε τη θέση με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους και παίρνουμε τη προβολική εικόνα των 21 σημείων του πλέγματος του Σχήματος 6.7. Παρατηρούμε ότι αντί για σημεία απεικονίζονται φαρδιές λωρίδες. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην ανακατασκευή της θέσης με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους η οποία φαίνεται εντονότερα στις περιφερειακές περιοχές του οπτικού πεδίου.



Σχήμα 6.7: Ανακατασκευή της θέσης των 21 ισαπέχοντων σημείων του πλέγματος με τη μέθοδο του κέντρου βάρους.

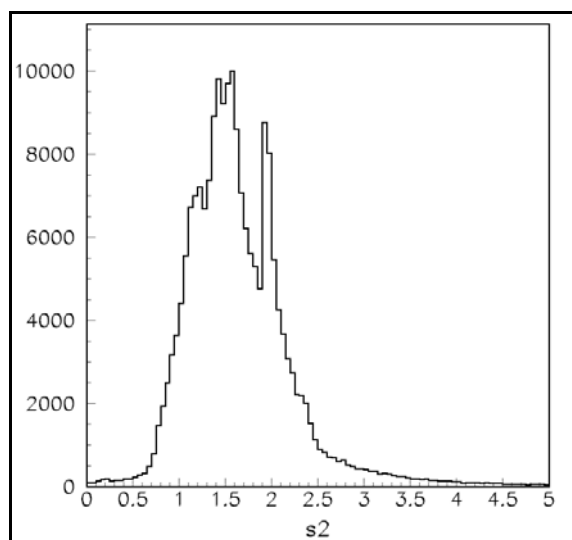
Στη συνέχεια εφαρμόζουμε τον νέο αλγόριθμο ανακατασκευής στα προηγούμενα δεδομένα. Η διαδικασία αυτή γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία: για κάθε καταγραφόμενο γεγονός καταγράφονται $8X+8Y$ δεδομένα που αντιστοιχούν στα φορτία κάθε καλωδίου. Για τα δεδομένα αυτά βρίσκεται η βέλτιστη κατανομή (που περιγράφεται από τις σχέσεις 6.2), προσδιορίζοντας τις τιμές των ελεύθερων παραμέτρων (A_1, s_1) και (A_2, s_2) πέραν του σημείου πρόσπτωσης (P_x, P_y) , από την οποία προκύπτουν τιμές φορτίων (των σχέσεων 6.3) οι οποίες να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις πειραματικά μετρούμενες τιμές του εκάστοτε γεγονότος. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης (αντίστροφο fit) επιτυγχάνεται από κατάλληλο αλγόριθμο σε γλώσσα FORTRAN χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες ελαχιστοποίησης του MINUIT. Έτσι για κάθε καταγεγραμμένο γεγονός αντιστοιχεί μια συνάρτηση G του αθροίσματος των δύο γκαουσιανών κατανομών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για κάθε γεγονός τελικά να προκύπτει η θέση του (P_x, P_y) και οι τιμές των μεταβλητών (s_1, s_2) και (A_1, A_2) .

Στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται η κατανομή του εύρους s_1 της γκαουσιανής κατανομής για τα δεδομένα του Σχήματος 6.7 χρησιμοποιώντας το LED οπτικού φωτός. Παρατηρούμε ότι ενδεικτική τιμή για την πλειοψηφία των δεδομένων είναι η τιμή 0.6 περίπου. Αυτή η τιμή χαρακτηρίζει την κατανομή του φωτός που παράγεται από το LED. Προφανώς χρησιμοποιώντας κρύσταλλο-σπινθηριστή όπου η κατανομή του φωτός είναι περισσότερο ευρεία η τιμή του εύρους s_1 θα είναι και μεγαλύτερη.



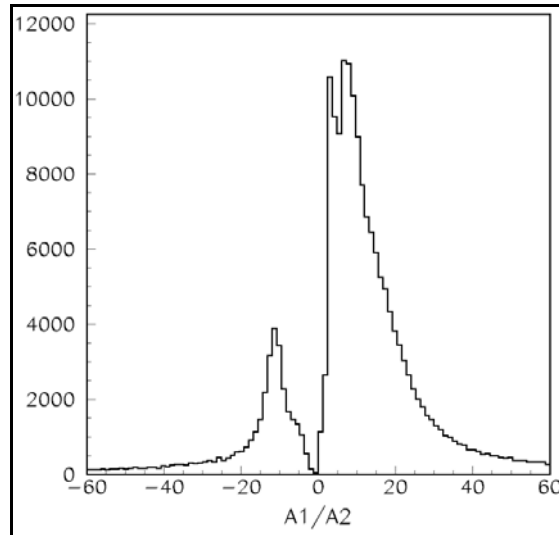
Σχήμα 6.8: Κατανομή της παραμέτρου s_1 των δεδομένων των σημείων του πλέγματος.

Στο Σχήμα 6.9 απεικονίζεται η κατανομή του εύρους s_2 της γκαουσιανής κατανομής που περιγράφεται από τις σχέσεις 6.2. Παρατηρούμε ότι, όπως αναμένουμε, οι τιμές της είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της κατανομής του s_1 (ενδεικτική τιμή για την πλειοψηφία των δεδομένων είναι η τιμή 1.5 περίπου).



Σχήμα 6.9: Κατανομή της παραμέτρου s_2 των δεδομένων των σημείων του πλέγματος.

Στο Σχήμα 6.10 απεικονίζεται η κατανομή του λόγου των παραμέτρων $A1/A2$. Παρατηρούμε ότι για μικρό αριθμό σωματιδίων είναι $A1/A2 < 0$. Τα γεγονότα αυτά πρέπει να απορρίπτονται γιατί δεν έχουν κάποια φυσική σημασία και δεν δικαιολογείται αρνητική τιμή του λόγου από το προτεινόμενο μοντέλο. Επίσης, πολύ μεγάλη τιμή του λόγου είναι ένδειξη για μη επιτυχημένη εφαρμογή της βελτιστοποίησης για τα δεδομένα αυτά. Ενδεικτική τιμή του λόγου αυτού για τα δεδομένα των σημείων του πλέγματος είναι περίπου η τιμή 10.



Σχήμα 6.10: Κατανομή του λόγου των παραμέτρων A_1/A_2 των δεδομένων των σημείων του πλέγματος.

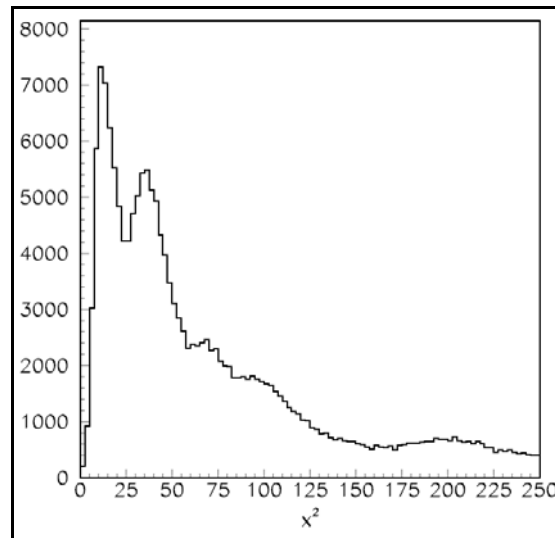
Επιπλέον, σε κάθε γεγονός στο οποίο εφαρμόζεται ο νέος αλγόριθμος ανακατασκευής καταγράφεται και μια τιμή του χ^2 . Μεγάλες τιμές της μεταβλητής αυτής δείχνουν αποτυχία εφαρμογής της βελτιστοποίησης στο συγκεκριμένο γεγονός (μικρά φορτία επηρεασμένα από θόρυβο). Είναι προφανές ότι όσο μικρότερη είναι τόσο πιο πετυχημένη είναι η βελτιστοποίηση. Η τιμή του χ^2 δίνεται από τον τύπο:

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N \frac{(Q_{th} - Q_{exp})^2}{Err_{exp}^2} \quad (6.5)$$

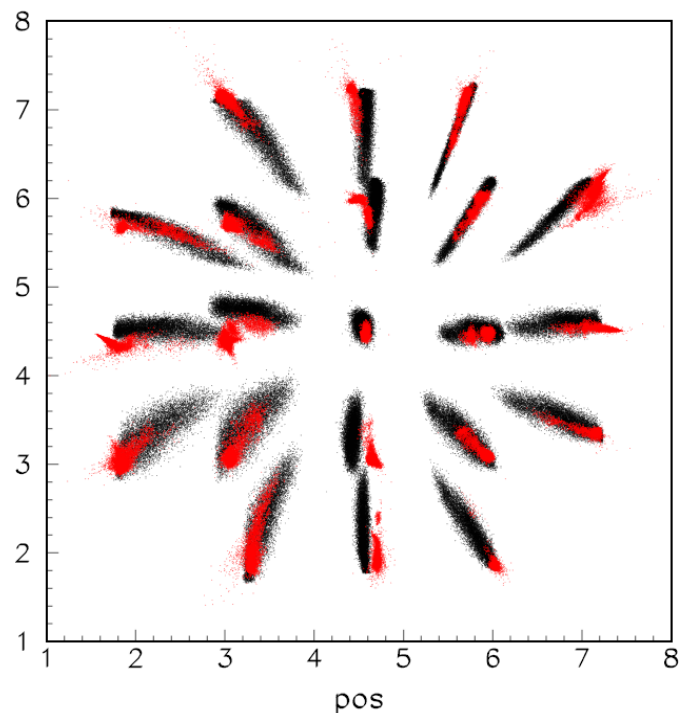
όπου Q_{th} είναι η θεωρητική τιμή του φορτίου του καλωδίου k (από τα συνολικά N) που προκύπτει από τη διαδικασία της ελαχιστοποίησης, Q_{exp} είναι το πειραματικά μετρούμενο φορτίο και Err_{exp} είναι το σφάλμα των πειραματικών δεδομένων.

Στο Σχήμα 6.11 βλέπουμε την κατανομή της παραμέτρου χ^2 των δεδομένων των 21 σημείων του πλέγματος. Παρατηρούμε ότι για τα περισσότερα δεδομένα προκύπτει τιμή του χ^2 μικρότερη από 150. Μεγαλύτερες τιμές του χ^2 είναι πάλι ένδειξη για μη επιτυχημένη εφαρμογή της βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε την ανακατασκευή της θέσης με τη νέα μέθοδο των βέλτιστων γκαουσιανών. Στο Σχήμα 6.12 βλέπουμε με μαύρο χρώμα τις θέσεις που προκύπτουν από την ανακατασκευή με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους και με κόκκινο τις αντίστοιχες θέσεις με τη νέα μέθοδο ανακατασκευής, δηλαδή τις τιμές των (P_x , P_y) που προκύπτουν από την εύρεση της βέλτιστης συνάρτησης G για κάθε καταγραφόμενο γεγονός. Παρατηρούμε ότι η νέα μέθοδος ανακατασκευής παράγει καλύτερα αποτελέσματα από αυτήν με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους αλλά και πάλι δεν είναι τόσο ικανοποιητικά γιατί εξακολουθεί να υπάρχει κάποια (σε μικρότερο βαθμό) διασπορά των σημείων για κάθε θέση του LED στο πλέγμα. Δεν έχουμε όμως λάβει υπόψη μας και τις άλλες παραμέτρους που καταγράφονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου όπως τις παραμέτρους s_1 , s_2 , A_1/A_2 και

το χ^2 . Έτσι θα προσπαθήσουμε στη συνέχεια να θέσουμε κάποια όρια στις προηγούμενες μεταβλητές και να βελτιώσουμε τη θέση με τη νέα μέθοδο ανακατασκευής.

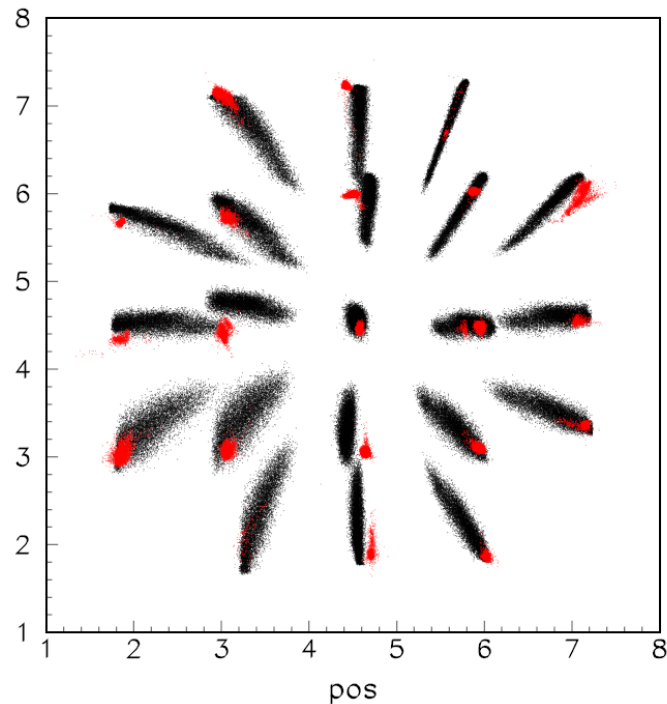


Σχήμα 6.11: Κατανομή της παραμέτρου χ^2 για τα δεδομένα των 21 σημείων του πλέγματος.



Σχήμα 6.12: Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η ανακατασκευή της θέσης με τη μέθοδο του κέντρου βάρους για τα δεδομένα των 21 σημείων του πλέγματος ενώ με κόκκινο είναι τα η ανακατασκευή με τη νέα μέθοδο.

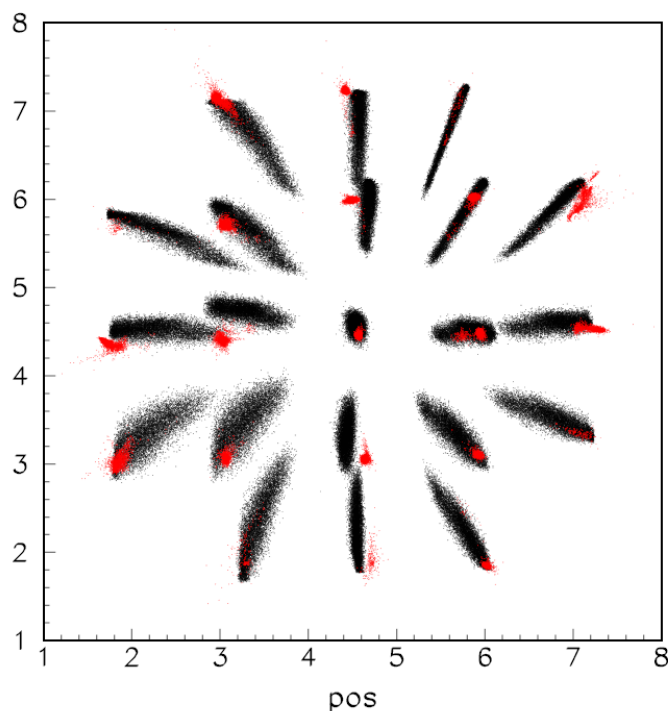
Αρχικά θέτουμε όριο στις παραμέτρους του εύρους της γκαουσιανής s_1 και s_2 . Δηλαδή απεικονίζουμε (με κόκκινο χρώμα) τα γεγονότα για τα οποία ισχύει $0.5 < s_1 < 0.7$ και $1.3 < s_2 < 2.0$. Με μαύρο χρώμα είναι πάλι τα γεγονότα των οποίων η θέση έχει ανακατασκευαστεί με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13: Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η ανακατασκευή της θέσης με τη μέθοδο του κέντρου βάρους των 21 σημείων του πλέγματος ενώ με κόκκινο είναι τα η ανακατασκευή με τη νέα μέθοδο θέτοντας όρια στις τιμές των s_1 και s_2 ($0.5 < s_1 < 0.7$ και $1.3 < s_2 < 2.0$).

Παρατηρούμε ότι η ανακατασκευή της θέσης χρησιμοποιώντας όρια στις παραμέτρους s_1 και s_2 βελτίωσε την απεικονιζόμενη θέση των περισσότερων σημείων (για άλλα σημεία περισσότερο και για άλλα λιγότερο) αλλά ορισμένα τα εξαφάνισε σχεδόν εντελώς. Δηλαδή βλέπουμε γενικά ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα καθολικό όριο στις τιμές των s_1 και s_2 γιατί υπάρχει εξάρτηση των τιμών τους από τη θέση του απεικονιζόμενου σημείου στο οπτικό πεδίο.

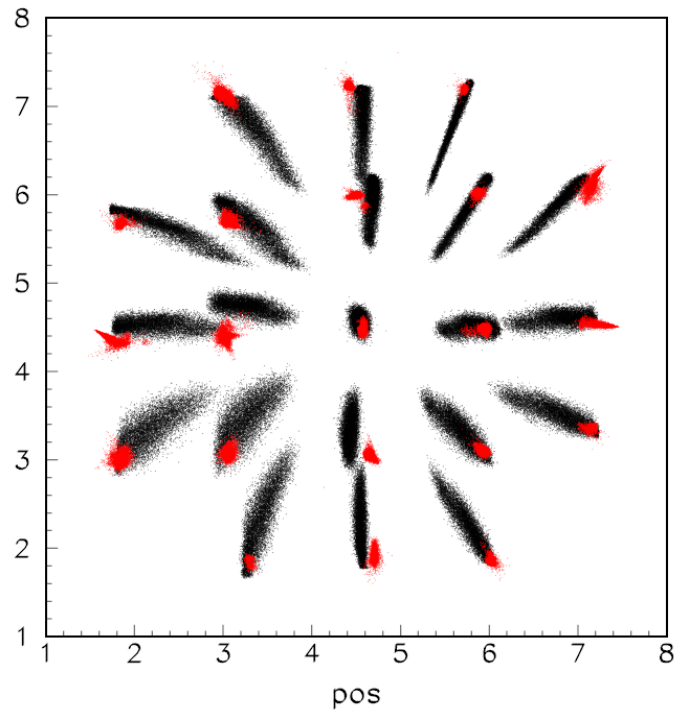
Στη συνέχεια θέτουμε όριο στις παραμέτρους του λόγου των υψών των δύο γκαουσιανών του μοντέλου A_1/A_2 . Απεικονίζουμε με κόκκινο χρώμα τα γεγονότα για τα οποία ισχύει $7 < A_1/A_2 < 13$ και με μαύρο πάλι τα γεγονότα των οποίων η θέση έχει ανακατασκευαστεί με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.14. Παρατηρούμε ότι ορισμένα σημεία απεικονίζονται αρκετά καλά αλλά και πάλι κάποια σημεία δεν διακρίνονται σχεδόν καθόλου δηλαδή έχουμε και στην περίπτωση αυτή εξάρτηση των τιμών του λόγου A_1/A_2 από τη θέση του απεικονιζόμενου σημείου στο οπτικό πεδίο και συνεπώς δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα καθολικό όριο στις τιμές του.



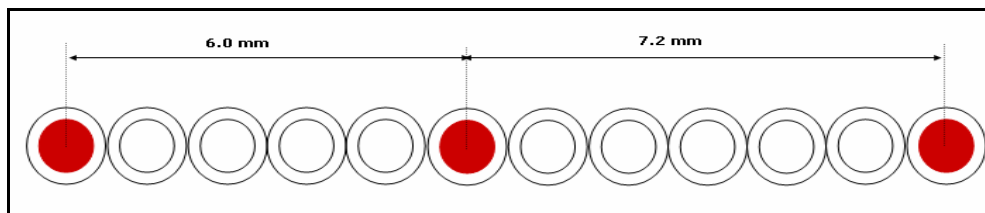
Σχήμα 6.14: Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η ανακατασκευή της θέσης με τη μέθοδο του κέντρου βάρους των 21 σημείων του πλέγματος ενώ με κόκκινο είναι τα η ανακατασκευή με τη νέα μέθοδο θέτοντας όρια στις τιμές του λόγου των υψών A_1/A_2 ($7 < A_1/A_2 < 13$).

Τέλος θέσαμε όριο στην τιμή του χ^2 την οποία υπολογίζουμε για κάθε γεγονός. Στο Σχήμα 6.15 προβάλλονται με κόκκινο χρώμα τα σημεία για τα οποία ισχύει $\chi^2 < 200$ (με μαύρο είναι πάλι η ανακατασκευή της θέσης με τη μέθοδο του κέντρου βάρους). Παρατηρούμε ότι με το κριτήριο του χ^2 έχουμε την καλύτερη δυνατή εικόνα. Όλα τα σημεία είναι ευδιάκριτα στην εικόνα και το εύρος στην απεικόνιση της θέσης τους έχει συρρικνωθεί σημαντικά. Επίσης βλέπουμε ότι το κριτήριο του χ^2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καθολικό κριτήριο στην απεικόνιση της θέσης με τη νέα μέθοδο ανακατασκευής γιατί η εξάρτηση της τιμής του από τη θέση του σημείου στο οπτικό πεδίο φαίνεται να είναι πολύ μικρή. Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος της βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε με επιτυχία στα δεδομένα που λήφθηκαν με το LED και τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα από αυτά με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους.

Στη συνέχεια προσπαθήσαμε να εφαρμόσουμε τη νέα μέθοδο ανακατασκευής και σε δεδομένα τα οποία λαμβάνουμε με πλήρες το σύστημα της γ -Κάμερα δηλαδή χρησιμοποιώντας και σπινθηριστή-κρύσταλλο (τον ομογενή CsI(Tl) πάχους 4mm) και κατευθυντήρα. Για το σκοπό αυτό τοποθετήσαμε στην επιφάνεια του κατευθυντήρα ομοίωμα από 3 τριχοειδής σωλήνες (Σχήμα 6.16 με κόκκινο χρώμα) οι οποίοι περιέχουν υδατικό διάλυμα ^{99m}Tc . Οι υπόλοιποι που διακρίνονται στο Σχήμα 6.16 με άσπρο χρώμα είναι άδειοι και χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της απόστασης μεταξύ των ‘θερμών’ σωληνοειδών.

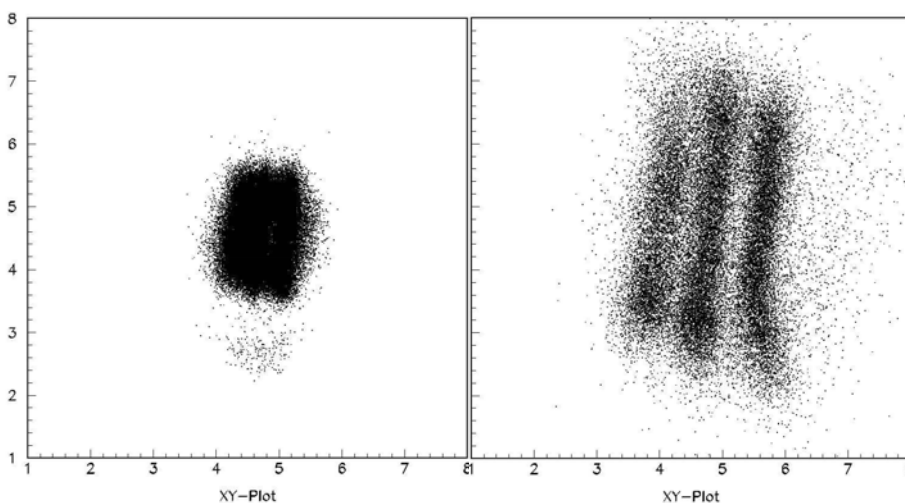


Σχήμα 6.15: Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η ανακατασκευή της θέσης με τη μέθοδο του κέντρου βάρους των 21 σημείων του πλέγματος ενώ με κόκκινο είναι τα η ανακατασκευή με τη νέα μέθοδο θέτοντας όρια στη τιμή του χ^2 κάθε γεγονότος ($\chi^2 < 200$).



Σχήμα 6.16: Το ομοίωμα των 3 τριχοειδών γεμισμένα με υδατικό διάλυμα ^{99m}Tc .

Η ανακατασκευή της θέσης έγινε χρησιμοποιώντας και τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους και το νέο αλγόριθμο ανακατασκευής [MIK10]. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.17.

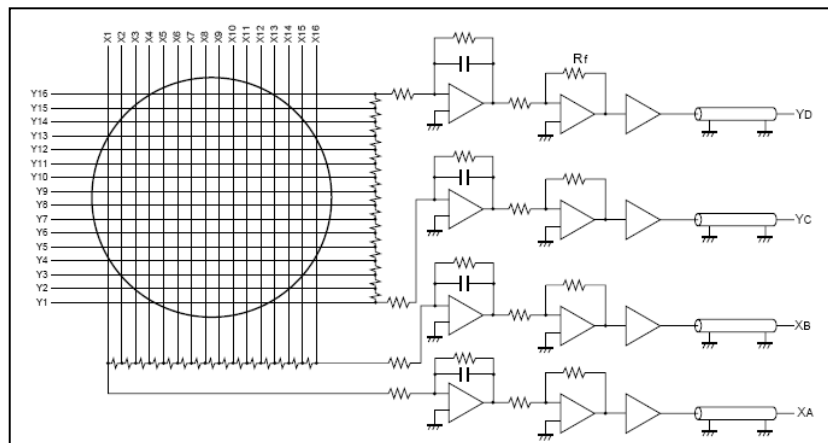


Σχήμα 6.17: Ανακατασκευή της θέσης του ομοιώματος των τριών τριχοειδών χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους (αριστερά) και τη νέα μέθοδο ανακατασκευής (δεξιά).

Παρατηρούμε ότι με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους εμφανίζεται το γνωστό πρόβλημα της συρρίκνωσης του οπτικού πεδίου και τα σωληνοειδή δεν διακρίνονται ενώ με το νέο αλγόριθμο ανακατασκευής τα τρία σωληνοειδή διακρίνονται καθαρά. Συνεπώς η νέα μέθοδος ανακατασκευής της θέσης εφαρμόστηκε με επιτυχία και στην περίπτωση της χρήσης του πλήρες συστήματος της γ-Κάμερα ακόμα και στην δύσκολη περίπτωση που χρησιμοποιούμε ομογενή (και όχι διακριτοποιημένο) κρύσταλλο σπινθηριστή.

6.4 Εφαρμογή της νέας μεθόδου ανακατασκευής της θέσης σε συστήματα γ-Κάμερα με διαιρέτη φορτίου

Οι χωρικά ευαίσθητοι φωτοπολλαπλασιαστές (PSPMTs) στο ανοδικό πλέγμα των οποίων εφαρμόζεται διαίρεση φορτίου, όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, παράγουν 4 εξερχόμενα σήματα, X_A , X_B , Y_C , Y_D , για κάθε προσπίπτον καταγραφόμενο γ-φωτόνιο (Σχήμα 6.18).



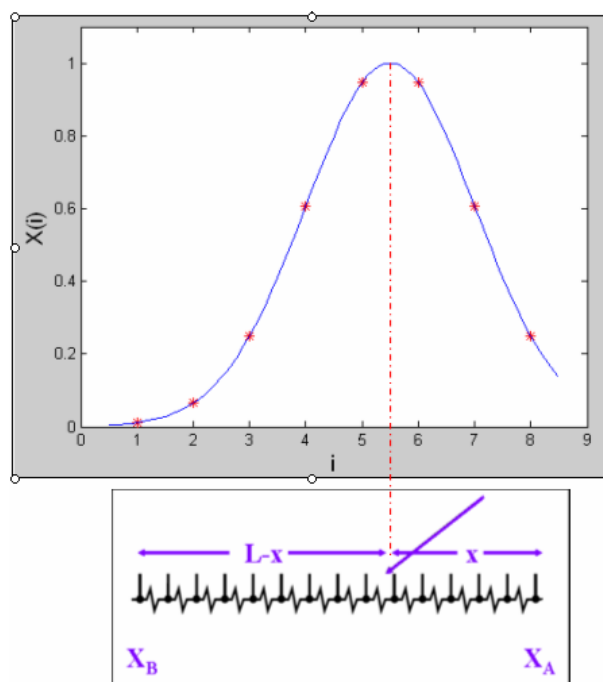
Σχήμα 6.18: Πολυ-ανοδικό πλέγμα του R2486 HAMAMATSU PSPMT, με την τεχνική Διαίρεσης Φορτίου (ΔΦ) και την προενίσχυση. Η ξεχωριστή καταγραφή όλων των παραγόμενων σημάτων είναι επίσης δυνατή.

Από τα τέσσερα αυτά σήματα ανακατασκευάζεται η θέση (X_{RC} , Y_{RC}) και η ενέργεια E_{RC} του προσπίπτοντος γ-φωτονίου χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$X_{RC} = \frac{X_A - X_B}{X_A + X_B}, \quad Y_{RC} = \frac{Y_C - Y_D}{Y_C + Y_D}, \quad E_{RC} = X_A + X_B + Y_C + Y_D \quad (6.6)$$

Η κατανομή του ηλεκτρονικού νέφους κατά μήκος του x άξονα που παράγεται από ένα προσπίπτον γ-φωτόνιο παρατηρείται στο άνω τμήμα του Σχήματος 6.19. Τα κόκκινα σημεία είναι τα N (εδώ N=8) καταγραφόμενα σήματα-φορτία κάθε καλωδίου ξεχωριστά τα οποία παράγονται και καταγράφονται από έναν PSPMT (όπως ο R2486-01, HAMAMATSU) στον οποίο δεν εφαρμόζεται διαίρεση φορτίου. Παρεμβάλλοντας N+1 (N-1 ενδιάμεσες και 2 ακραίες) ίσες αντιστάσεις μεταξύ των N σημάτων εφαρμόζουμε διαίρεση φορτίου με την οποία παράγονται 2 σήματα σε κάθε άξονα - X_A , X_B , Y_C , Y_D , (κάτω τμήμα του Σχήματος

6.19) – οι τιμές των οποίων εξαρτώνται άμεσα από τη θέση και την ενέργεια του προσπίπτοντος γ -φωτονίου. Δηλαδή είναι ανάλογα της ενέργειας του και αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης x του άκρου μέτρησης από το σημείο πρόσπτωσης του γ -φωτονίου. Άρα όπως φαίνεται και στις σχέσεις 6.6 η ενέργεια υπολογίζεται από το άθροισμα των τεσσάρων σημάτων ενώ η ανακατασκευή της θέσης είναι ανάλογη της διαφοράς των αντίστοιχων σημάτων σε κάθε άξονα, κανονικοποιημένη ως προς το άθροισμά τους.



Σχήμα 6.19: Άνω τμήμα: Τα N (εδώ $N=8$) παραγόμενα φορτία στον x άξονα (κόκκινα σημεία) από έναν R2486 HAMAMATSU PSPMT και η καμπύλη που περιγράφει την κατανομή τους (συνεχή μπλε γραμμή). **Κάτω τμήμα:** Η εφαρμογή της διαίρεσης φορτίου στα παραπάνω δεδομένα και τα δύο παραγόμενα σήματα X_A και X_B .

Είναι φανερό ότι με την τεχνική αυτή απαλείφεται η πληροφορία της κατανομής του ηλεκτρονικού νέφους το οποίο προσπίπτει στο ανοδικό πλέγμα του φωτοπολλαπλασιαστή. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν καταγράφεται η πληροφορία (δηλαδή οι τιμές) και των $2N$ ($NX+NY$) φορτίων των αντίστοιχων καλωδίων στα οποία εφαρμόζοντας τη μέθοδο του αντίστροφου fit που περιγράφηκε προηγουμένως να εξαχθεί η κατανομή τους (δηλαδή να βρεθεί η βέλτιστη συνάρτηση G των σχέσεων 6.2). Αντιθέτως, έχοντας ως δεδομένα μόνο τα δύο παραγόμενα σήματα σε κάθε άξονα δεν είναι δυνατή η εύρεση της βέλτιστης κατανομής του ηλεκτρονικού νέφους G από την οποία παρήχθησαν τα σήματα αυτά.

Στη συνέχεια, αποδεικνύεται ότι ο προηγούμενος αλγόριθμος Διαίρεσης Φορτίου ανακατασκευής της θέσης είναι ισοδύναμος με τον αλγόριθμο Κέντρου Βάρους που χρησιμοποιείται σε συστήματα γ -Κάμερα (όπως ο R2486-01 HAMAMATSU) στα οποία καταγράφονται ξεχωριστά και τα $NX+NY$ σήματα του ανοδικού πλέγματος. Είναι γνωστό ότι η ανακατασκευασμένη θέση (X_{COG} , Y_{COG}) όπως υπολογίζεται από τον αλγόριθμο του Κέντρου Βάρους (center of gravity, COG) περιγράφεται από τις σχέσεις 6.1.

Λόγω της διαίρεσης φορτίου αφού παρεμβάλλονται $N+1$ ίσες αντιστάσεις μεταξύ των καλωδίων μπορούμε να κάνουμε την απλή παραδοχή ότι :

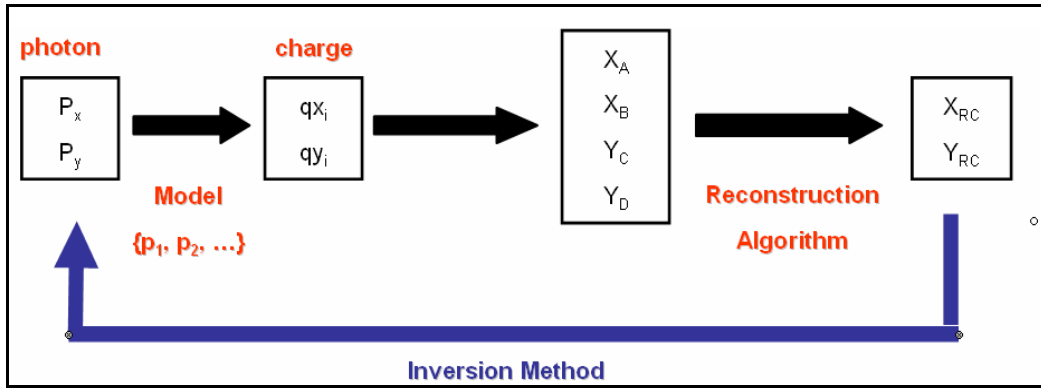
$$X_A = \sum_{i=1}^N \frac{(N-i)}{N+1} qx_i, \quad X_B = \sum_{i=1}^N \frac{i}{N+1} qx_i \quad (6.7)$$

Τότε στη διάσταση x (αντίστοιχα και για την διάσταση y) η σχέση 6.6 μετασχηματίζεται όπως φαίνεται παρακάτω:

$$X_{RC} = \frac{X_A - X_B}{X_A + X_B} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{(N-i)}{N+1} qx_i - \sum_{i=1}^N \frac{i}{N+1} qx_i}{\sum_{i=1}^N \frac{(N-i)}{N+1} qx_i + \sum_{i=1}^N \frac{i}{N+1} qx_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{(N-i)-i}{N+1} \right) qx_i}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{(N-i)+i}{N+1} \right) qx_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{N-2i}{N+1} qx_i}{\sum_{i=1}^N qx_i} \quad (6.8)$$

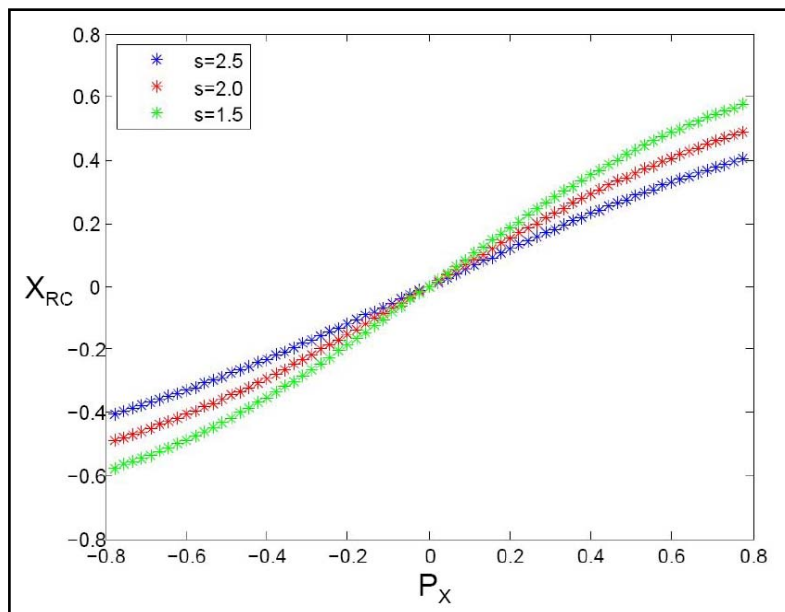
Από το παραπάνω αποτέλεσμα είναι προφανές ότι η ανακατασκευή της θέσης με τον αλγόριθμο της Διάρεσης Φορτίου (σχέσεις 6.6) είναι ισοδύναμη με αυτήν του Κέντρου Βάρους των σχέσεων 6.1. Η μόνη διαφορά των δύο αλγορίθμων βρίσκεται στο πεδίο τιμών τους. Η παραπάνω ισοδυναμία δείχνει, όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια, ότι όλα τα μειονεκτήματα που παρατηρούνται στην ανακατασκευή της θέσης από τον αλγόριθμο Κέντρου Βάρους παρατηρούνται και στην ανακατασκευή της με τον αλγόριθμο Διάρεσης Φορτίου (μέτρηση ελαττωμένου φορτίου στα άκρα του οπτικού πεδίου και μη γραμμικότητα στην απεικόνιση της θέσης) και αντίστροφα. Τα προβλήματα αυτά οδηγούν στις παραμορφώσεις που παρατηρούνται στις προβολικές εικόνες των συστημάτων αυτών και οι οποίες είναι εντονότερες στην περιφέρεια του οπτικού τους πεδίου.

Παρατηρώντας τις σχέσεις 6.2 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι γνωρίζοντας τις τιμές s_1 , s_2 και A_1/A_2 μπορούμε να υπολογίσουμε τα φορτία qx_i και qy_i από τις σχέσεις 6.3 (για συγκεκριμένες τιμές της θέσης (P_x, P_y)) και χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.7 (και την αντίστοιχη της για τον y άξονα) να βρούμε την αντίστοιχη ανακατασκευασμένη θέση που προκύπτει από τον αλγόριθμο Διάρεσης Φορτίου. Με τον τρόπο αντιστοιχίζουμε '1-1' τις συντεταγμένες (P_x, P_y) με τις (X_{RC}, Y_{RC}) . Αντιστρέφοντας την προηγούμενη διαδικασία (Σχήμα 6.20) μπορούμε να βρούμε την ονομαστική και διορθωμένη θέση (P_x, P_y) ενός γεγονότος από την πειραματικά μετρούμενη θέση του (X_{RC}, Y_{RC}) γνωρίζοντας μόνο την αντιστοιχία (P_x, P_y) σε (X_{RC}, Y_{RC}) για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων $s_1, s_2, A_1/A_2$. Οι παράμετροι $s_1, s_2, A_1/A_2$ (σε περίπτωση ομογενούς κρυστάλλου οι παράμετροι s_2 και A_1/A_2 δεν χρειάζονται) εξαρτώνται μόνο από το είδος και το πάχος του κρυστάλλου (για συγκεκριμένη ενέργεια των γ -φωτονίων).



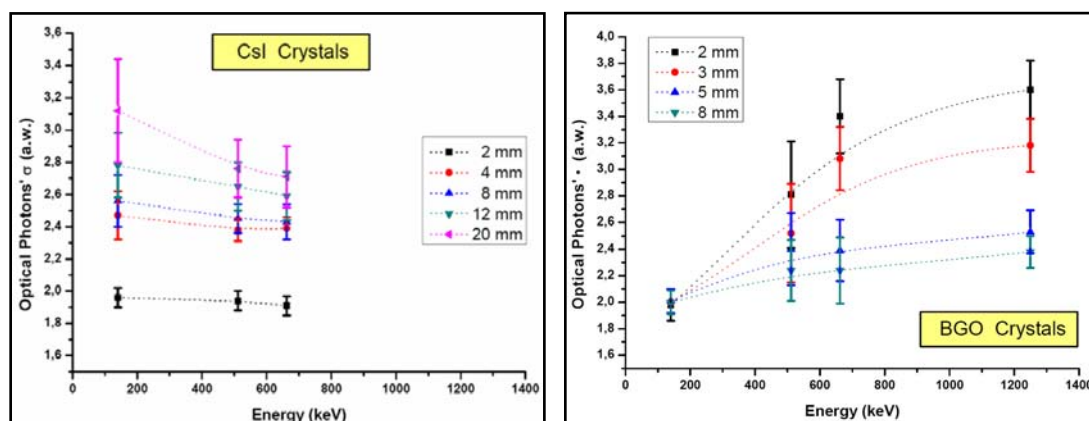
Σχήμα 6.20: Εύρεση της ονομαστικής θέσης ενός γεγονότος από την πειραματικά μετρούμενη του, χρησιμοποιώντας τη νέα μέθοδο ανακατασκευής της θέσης.

Για να βρεθεί η επίδραση της παραμέτρου s_1 στην εφαρμογή της μεθόδου (θεωρώντας ότι έχουμε ομογενή κρύσταλλο), θα υπολογιστεί η ανακατασκευή της θέσης X_{RC} για τις διάφορες τετμημένες πρόσπτωσης του ηλεκτρονικού νέφους στο ανοδικό πλέγμα P_x (θεωρώντας το P_y μηδέν) για 3 διαφορετικές τιμές του εύρους s_1 (1.5, 2.0, 2.5). Τα αποτελέσματα $X_{RC} = f(P_x)$ φαίνονται στο Σχήμα 6.21. Παρατηρείται συστηματική απόκλιση από τη γραμμικότητα η οποία είναι μεγαλύτερη όσο το P_x βρίσκεται πιο κοντά στα άκρα του οπτικού πεδίου του PSPMT και όσο μεγαλύτερη είναι η παράμετρος s_1 της γκαουσιανής κατανομής. Η απόκλιση αυτή οδηγεί σε μείωση του εύρους τιμών της ανακατασκευασμένης θέσης και άρα συρρίκνωση του ανακατασκευασμένου οπτικού πεδίου του συστήματος σε σχέση με το πραγματικό του εύρος.



Σχήμα 6.21: Γραφική παράσταση της $X_{RC} = f(P_x)$ για την περίπτωση ομογενούς κρυστάλλου (δηλαδή $G_2=0$) για 3 διαφορετικές τιμές της παραμέτρου s_1 . X_{RC} είναι η κλασικά ανακατασκευασμένη θέση και P_x η ονομαστική θέση πρόσπτωσης του γ-φωτονίου στον κρύσταλλο-σπινθηριστή εφαρμόζοντας τη νέα μέθοδο ανακατασκευής.

Η παράμετρος s_1 (και οι s_2 και A_1/A_2 στην περίπτωση που έχουμε διακριτοποιημένο κρύσταλλο) δεν μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά όταν εφαρμόζεται διαίρεση φορτίου αλλά μόνο καταγράφοντας τα φορτία κάθε καλωδίου ξεχωριστά. Για το σκοπό ελήφθησαν πειραματικά δεδομένα με ακτινοβολία των διαφόρων κρυστάλλων του εργαστηρίου τοποθετημένους στο σύστημα του R2486-01 HAMAMATSU φωτοπολλαπλασιαστή ο οποίος καταγράφει τις τιμές και των 8X+8Y φορτίων. Από τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκε η παράμετρος s_1 (με τη διαδικασία του αντίστροφου fit που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο) που είναι το εύρος της γκαουσιανής κατανομής των οπτικών φωτονίων για διάφορα είδη και πάχη κρυστάλλων [ΜΙΚ08].

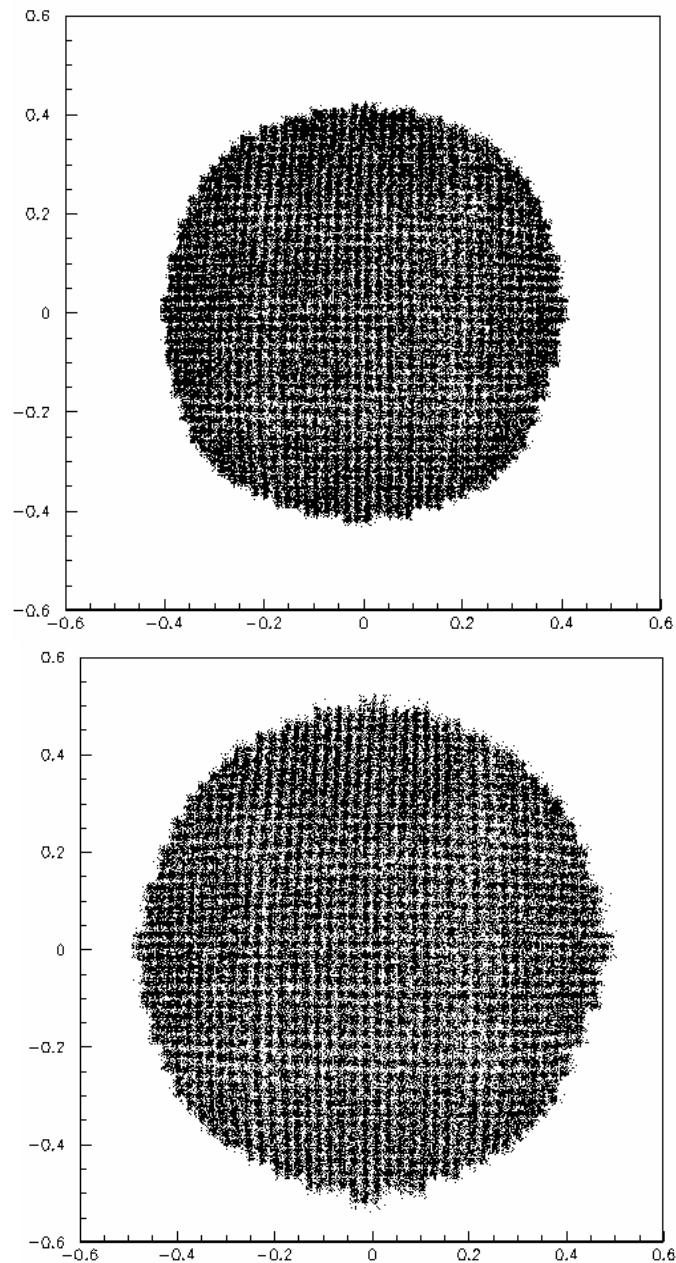


Σχήμα 6.22: Γραφική παράσταση της παραμέτρου s_1 σε συνάρτηση με την ενέργεια του γ -φωτονίου για διαφορετικά πάχη των κρυστάλλων-σπινθηριστών CsI(Tl) (αριστερά) και BGO (δεξιά).

Οι τιμές της s_1 καταγράφονται και χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή του μοντέλου στην περίπτωση που έχουμε διαίρεση φορτίου στο ανοδικό πλέγμα του PSPMT (HAMAMASTSU R2486-04). Στο Σχήμα 6.22 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις του s_1 για διάφορα πάχη και ενέργειες των γ -φωτονίων για τους κρυστάλλους CsI(Tl) (αριστερά) και BGO (δεξιά).

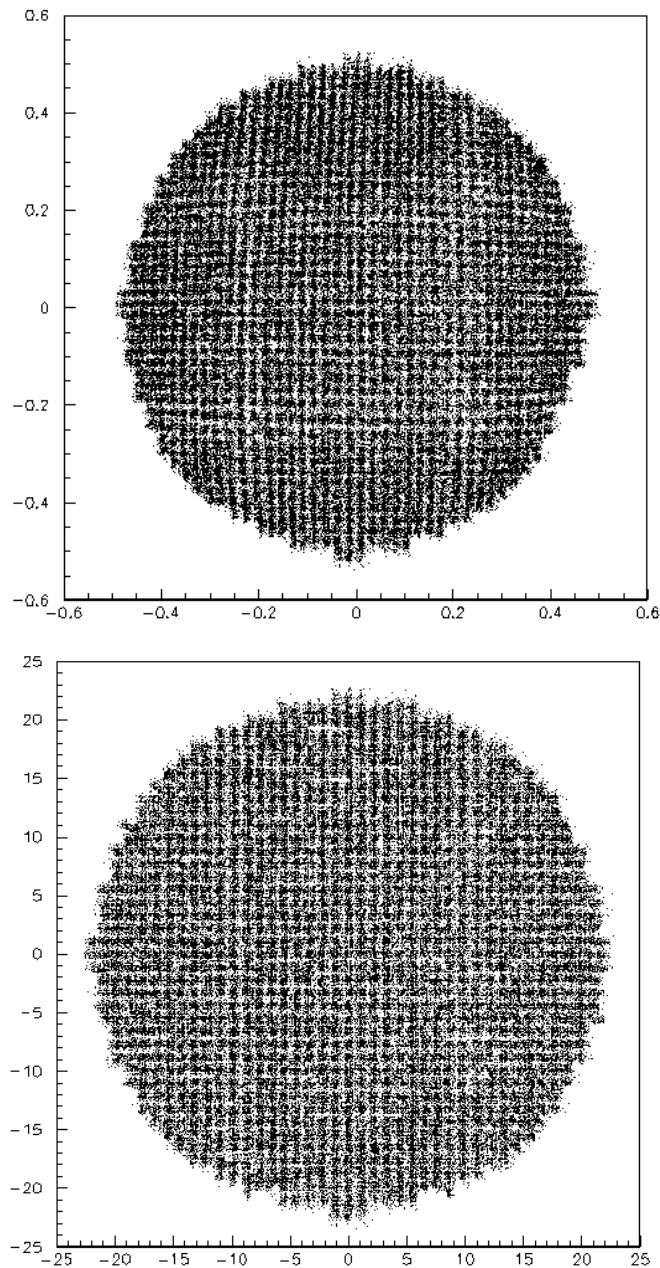
Στο Σχήμα 6.23 παρατηρείται η εφαρμογή της νέας μεθόδου ανακατασκευής σε πειραματικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκε διακριτοποιημένος κρύσταλλος CsI(Tl) πάχους 4mm και ο οποίος χαρακτηρίστηκε (πειραματικά) από $s_1 = 0.7$, $s_2 = 2.1$ και $A_1/A_2 = 10$ χρησιμοποιώντας ραδιενεργή πηγή ^{60}Co . Από τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφονται από το σύστημα (X_A , X_B , Y_C , Y_D) αναπαράγουμε την προβολική εικόνα του κρυστάλλου με τον κλασικό αλγόριθμο ανακατασκευής Διαίρεσης Φορτίου (Σχήμα 6.23 - πάνω) και με τη νέα μέθοδο ανακατασκευής (Σχήμα 6.23 - κάτω).

Συγκρίνοντας τις εικόνες παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή της νέας μεθόδου ανακατασκευής η βαρελοειδής παραμόρφωση έχει ελαττωθεί σημαντικά και η διακριτική ικανότητα έχει βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό και το εύρος του οπτικού πεδίου έχει αυξηθεί.



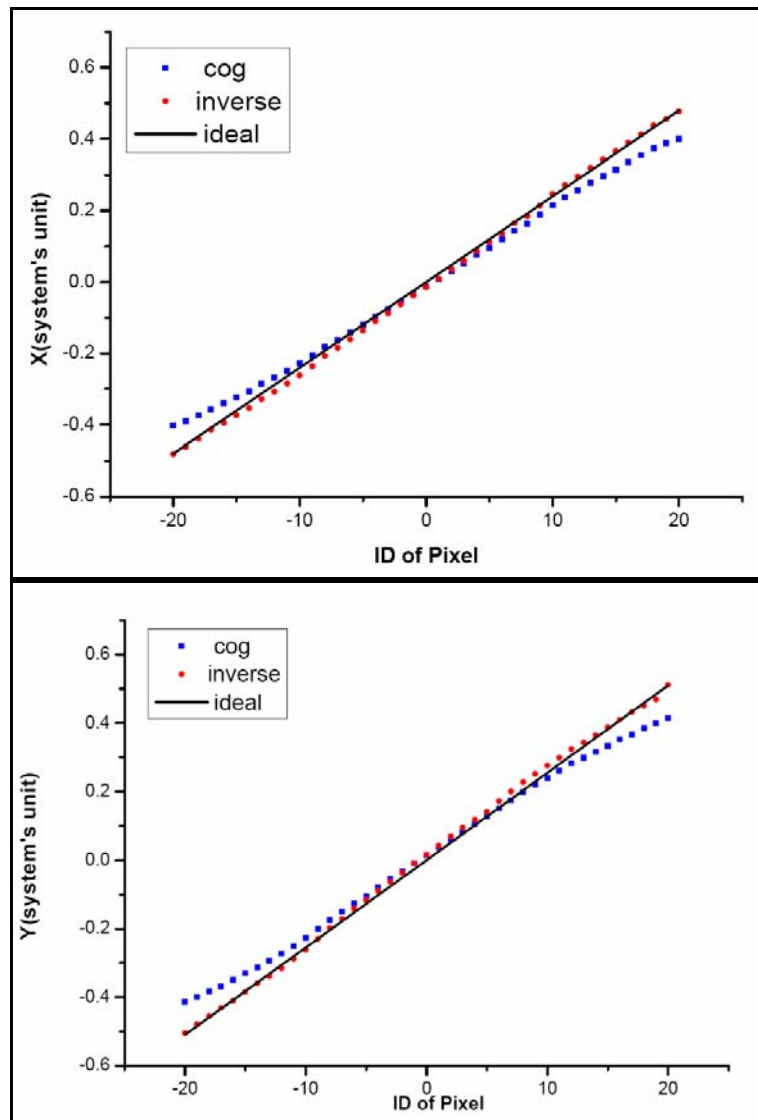
Σχήμα 6.23: Προβολική εικόνα του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl), μετά από ακτινοβόληση με πηγή ^{60}Co εφαρμόζοντας τον κλασικό αλγόριθμο Διαίρεσης Φορτίου ανακατασκευής της θέσης (πάνω) και τη νέα μέθοδο ανακατασκευής της θέσης (κάτω). Οι πειραματικά μετρούμενες τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι $(s_1, s_2)=(0.7, 2.1)$ και $A_1/A_2=10$.

Για την πλήρη απαλοιφή της βαρελοειδούς παραμόρφωσης εφαρμόζουμε στην προβολική εικόνα που προκύπτει από της νέα μέθοδο ανακατασκευής, τη μέθοδο διόρθωσης της χωρικής παραμόρφωσης που έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.24 όπου παρατηρείται ότι πράγματι η βαρελοειδής παραμόρφωση έχει εξαιρεθεί πλήρως και επιπρόσθετα έχει βελτιωθεί η ομοιογένειά της ως ένα βαθμό.



Σχήμα 6.24: Προβολική εικόνα του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl), μετά από ακτινοβόληση με πηγή ^{60}Co ανακατασκευάζοντας τη θέση με τη νέα μέθοδο ανακατασκευής (πάνω) και εφαρμόζοντας σε αυτή την μέθοδο διόρθωσης της χωρικής παραμόρφωσης (κάτω).

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η γραμμικότητα της θέσης ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία: εξάγονται, με κατάλληλο πρόγραμμα γραμμένο σε FORTRAN στο οποίο χρησιμοποιείται το γραφικό πακέτο HIGZ (High level Interface of Graphics and ZEBRA) του CERN, οι συντεταγμένες της κεντρικής γραμμής και στήλης των προβολικών εικόνων του Σχήματος 6.23. Στη συνέχεια κατασκευάζονται και απεικονίζονται στο Σχήμα 6.25 οι γραφικές παραστάσεις της θέσης του pixel σε συνάρτηση με το ID του.



Σχήμα 6.25: Γραφική παράσταση της ανακατασκευασμένης θέσης κάθε pixel σε σχέση με το ID του για την κεντρική γραμμή (πάνω) και στήλη (κάτω) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο κέντρου βάρους (μπλε σημεία) και τη νέα μέθοδο ανακατασκευής (κόκκινα σημεία).

Παρατηρείται ότι με τον αλγόριθμο του κέντρου βάρους (Σχήμα 6.25 – μπλε σημεία) έχουμε απόκλιση από τη γραμμικότητα η οποία είναι εντονότερη στα άκρα του οπτικού πεδίου ενώ χρησιμοποιώντας τη νέα μέθοδο ανακατασκευής (Σχήμα 6.25 – κόκκινα σημεία) η γραμμικότητα έχει αποκατασταθεί σε μεγάλο βαθμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αξιολόγηση του Τελικού Συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων ελέγχου που έγιναν μετά την βελτιστοποίηση του συστήματος της γ-Κάμερα. Σκοπός των μετρήσεων αυτών είναι να ελεγχθεί το σύστημα ως προς την ποιότητα των εικόνων (προβολικών και τομογραφικών) που παράγει και ως προς την καταλληλότητά του να χρησιμοποιηθεί σε κλινικό περιβάλλον για την καταγραφή μικρών οργάνων (λεμφαδένες, θυρεοειδής, μαστός). Η σκέδαση της ακτινοβολίας μέσα στο ανθρώπινο σώμα είναι ένας κύριος παράγοντας που δυσχεραίνει την σωστή απεικόνιση της ραδιενεργού κατανομής του ιχνηθέτη, συγκρινόμενη με το εργαστηριακό αποτέλεσμα ομοιωμάτων τα οποία ως γνωστόν δεν εμπεριέχουν τις δυσκολίες αυτές. Για τον έλεγχο της δυνατότητας του συστήματος να χρησιμοποιηθεί σε κλινικό περιβάλλον, κατασκευάστηκε ομοίωμα από γέλη (gel) ισοδύναμης πυκνότητας με το νερό, επομένως και ιστού, μέσα στο οποίο τοποθετήθηκαν ραδιενεργές πηγές όγκου και απεικονίστηκαν από το σύστημα της γ-Κάμερα. Με τον τρόπο αυτό απεικονίστηκε η κλινική πραγματικότητα πιο ρεαλιστικά, λαμβάνοντας ενδογενώς υπόψη την σκέδαση και απορρόφηση της ακτινοβολίας στον περιβάλλοντα χώρο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Πλήρης περιγραφή του πειράματος με τα προβολικά και τομογραφικά αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στα επόμενα.

Πριν την εκτέλεση του πειράματος αυτού γίνεται έλεγχος του τελικού συστήματος ως προς την καταλληλότητα του επιλεγμένου κατευθυντήρα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ενδεικτικά ένας άλλος κατευθυντήρας μεγαλύτερων οπών εν είδη πλέγματος και μελετάται η ποιότητα της προβολικής εικόνας για διαφορετικές ενέργειες ιχνηθέτη. Αποδεικνύεται πως για ενέργειες ^{99m}Tc , που θα χρησιμοποιηθούν στο τελικό πείραμα των ομοιωμάτων, η απόδοση του κατευθυντήρα σε σχέση με τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι βέλτιστη.

7.1 Προβολικές λήψεις με διαφορετικές ενέργειες ιχνηθέτη

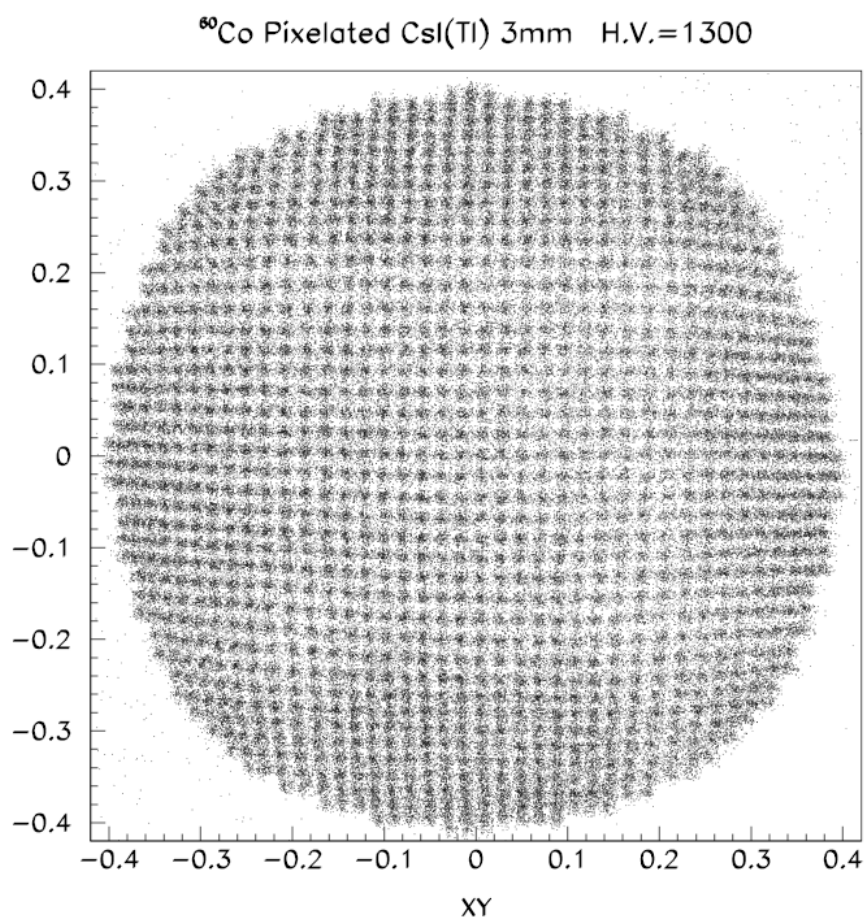
Ο έλεγχος της καταλληλότητας του συστήματος και ιδιαίτερα του πάχους του κατευθυντήρα για ενέργειες ιχνηθέτη στην περιοχή του ^{99m}Tc (140keV) γίνεται με τη χρήση ενός άλλου κατευθυντήρα μεγάλων οπών, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε σαν πλέγμα σε ομοιόμορφη εκπομπή ακτινοβολίας. Σκοπός του ελέγχου είναι η εκτίμηση της καθαρότητας του απεικονιζόμενου πλέγματος έναντι ανεπιθύμητων είτε σκεδαζόμενων φωτονίων είτε φωτονίων που διαπερνούν τα τοιχώματα.

Ακτινοβολήθηκε ο διακριτοποιημένος κρύσταλλος – σπινθηριστής (πάχους 4mm) CsI(Tl) από πηγή ^{60}Co (σε απόσταση περίπου 10cm από τον κρύσταλλο) χωρίς τη χρήση κατευθυντήρα. Μετά από ενεργειακό φιλτράρισμα των χαμηλο-ενεργειακών φωτονίων παράγεται η προβολική εικόνα του Σχήματος 7.1. Παρατηρούμε ότι η παραγόμενη προβολική

εικόνα είναι καλής ποιότητας, τα pixel του διακριτοποιημένου κρυστάλλου, τα οποία είναι τετράγωνα πλευράς 1mm, διακρίνονται πολύ καθαρά σε ολόκληρο το οπτικό πεδίο της γ-Κάμερα. Αυτό επιβεβαιώνει, όπως συζητήθηκε ήδη στα προηγούμενα κεφάλαια την ορθή ρύθμιση και λειτουργία των επιμέρους τμημάτων της συσκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην εξαρτάται η ανακατασκευασμένη θέση από την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου ιδιότητα η οποία είναι απαραίτητη για την ελάττωση του θορύβου των προβολικών εικόνων.

Πάχος, T	50mm
Διάμετρος οπών, D	5mm
Απόσταση Οπών, HOLSEP	7mm
Πάχος διαφράγματος, SPT	2mm
X(mm)	58mm
Y(mm)	58mm

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά του κατευθυντήρα παραλλήλων κυκλικών οπών που χρησιμοποιήθηκε κατά την ακτινοβόληση του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) από 3 ραδιενεργές πηγές.



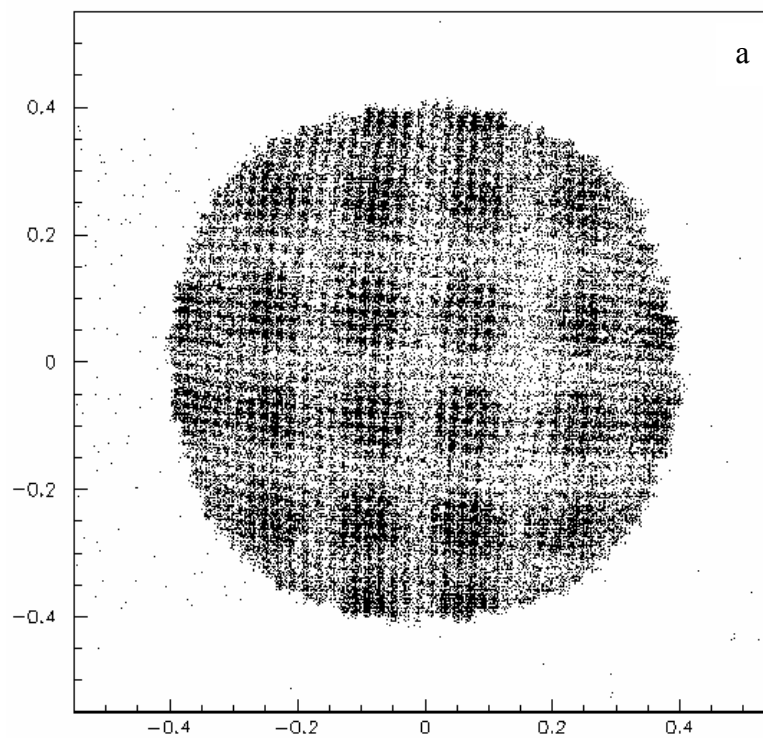
Σχήμα 7.1: Προβολική εικόνα του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) μετά από ακτινοβόληση του από πηγή ⁶⁰Co χωρίς τη χρήση κατευθυντήρα, φιλτράροντας τα χαμηλο-ενεργειακά φωτόνια.

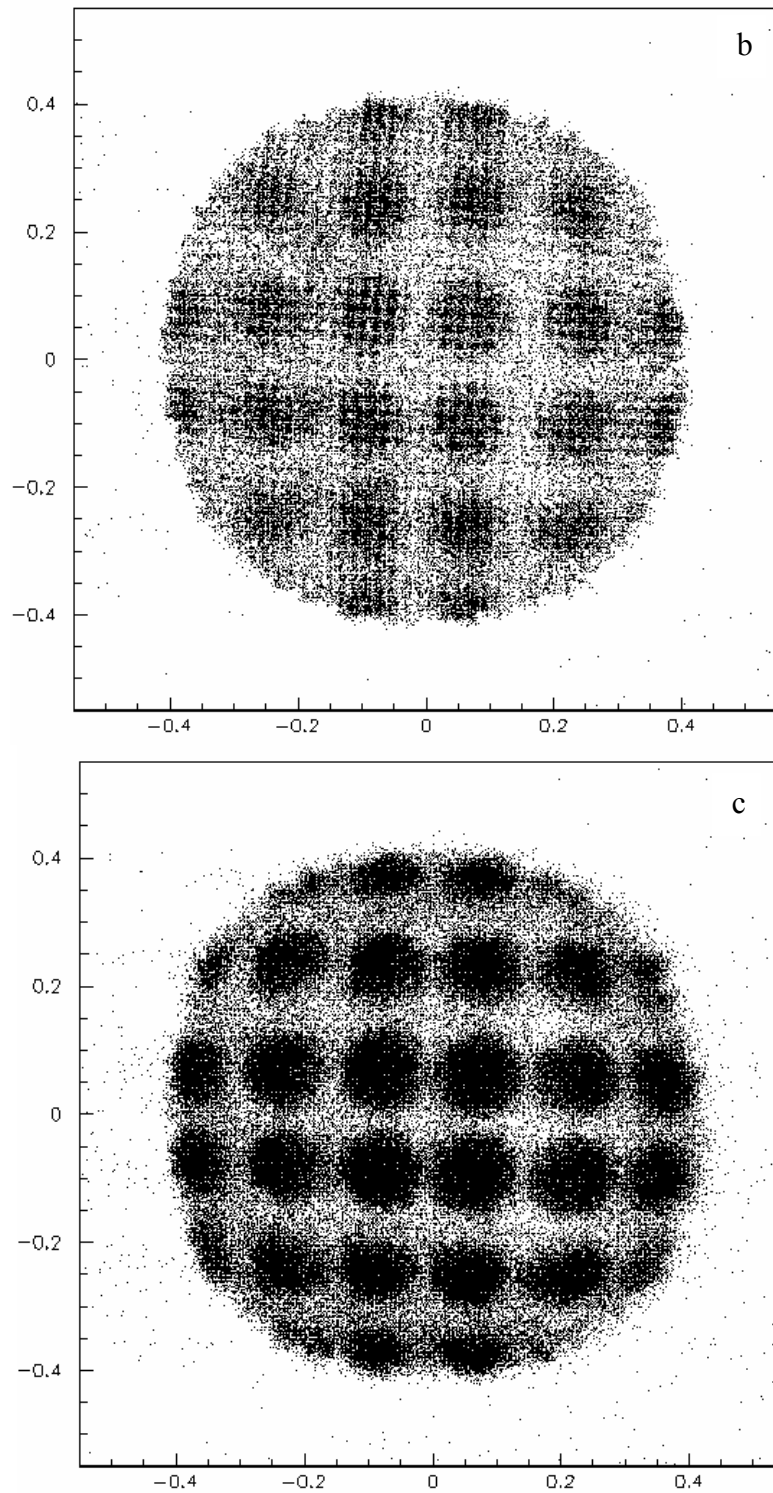
Ακολούθησε λήψη δεδομένων ύστερα από ακτινοβόληση του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) χρησιμοποιώντας κατευθυντήρα παραλλήλων κυκλικών οπών του Σχήματος 7.2 και γεωμετρικών χαρακτηριστικών που αναφέρονται στον Πίνακα 7.1.



Σχήμα 7.2: Ο κατευθυντήρας παραλλήλων οπών που χρησιμοποιήθηκε κατά την ακτινοβόληση του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) από 3 ραδιενεργές πηγές.

Ο κρύσταλλος ακτινοβολήθηκε από 3 ραδιενεργές πηγές: ^{60}Co ($E_{\text{φωτ}}=1.17\text{MeV}$ και 1.33MeV), ^{137}Cs ($E_{\text{φωτ}}=0.66\text{MeV}$) και $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ($E_{\text{φωτ}}=0.14\text{MeV}$) και οι προβολικές εικόνες κάθε ακτινοβόλησης φαίνονται στο Σχήμα 7.3.





Σχήμα 7.3: Προβολικές εικόνες του διακριτοποιημένου κρυστάλλου CsI(Tl) ύστερα από ακτινοβόληση του από 3 ραδιενεργές πηγές: a) ^{60}Co , b) ^{137}Cs και c) $^{99\text{m}}\text{Tc}$, χρησιμοποιώντας τον κατευθυντήρα παραλλήλων κυκλικών οπών του Σχήματος 7.2.

Στις προβολικές εικόνες του Σχήματος 7.3 παρατηρείται, όπως αναμένεται θεωρητικά, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό τους που διαπερνά τον κατευθυντήρα με αποτέλεσμα να διακρίνονται όλο και λιγότερο οι οπές του κατευθυντήρα με την αύξηση της ενέργειας των φωτονίων και να

χειροτερεύει η διακριτική ικανότητα του συστήματος. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις του λόγου σήματος/θόρυβο (S/N) που έγιναν για τα 3 ισότοπα που χρησιμοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 7.2.

	^{60}Co	^{137}Cs	$^{99\text{m}}\text{Tc}$
S/N	4.9±0.5	6.5±0.6	23.2±1.5

Πίνακας 7.2: Λόγος σήματος/θόρυβο (S/N) για τα 3 διαφορετικά ισότοπα που χρησιμοποιήθηκαν.

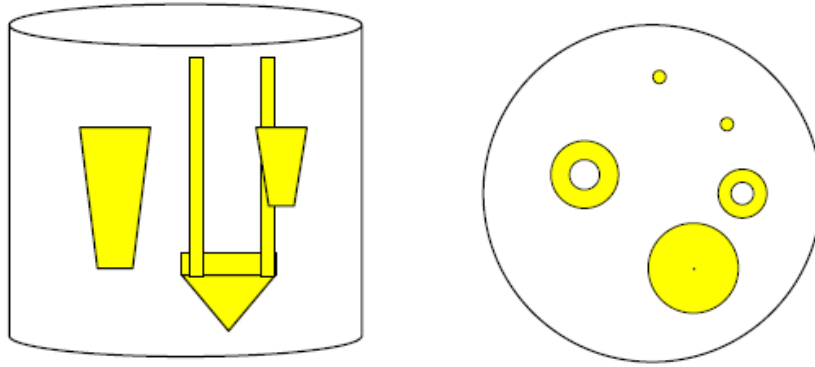
Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι ενώ για τα ισότοπα ^{60}Co και ^{137}Cs οι τιμές του λόγου S/N είναι παραπλήσιες, για το $^{99\text{m}}\text{Tc}$ η τιμή του αντίστοιχου λόγου αυξάνει πολύ, γεγονός που δείχνει την καταλληλότητα του συγκεκριμένου ισοτόπου, όπως και άλλων ισοτόπων εκπεμπόμενων φωτονίων παραπλήσιων ενεργειών του $^{99\text{m}}\text{Tc}$, για χρήση τους είτε σε εργαστηριακές είτε σε κλινικές μετρήσεις. Συνεπώς το ισότοπο αυτό ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) θα χρησιμοποιηθεί ως ιχνηθέτης στο επόμενο πείραμα.

7.2 Λήψη πειραματικών δεδομένων τύπου SPECT (Υπολογιστικής Τομογραφίας)

Το πείραμα SPECT το οποίο εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας κατάλληλο ομοίωμα gel, είχε σκοπό τον έλεγχο της απόδοσης του συστήματος σε συνθήκες ενδογενούς σκέδασης και απορρόφησης της ακτινοβολίας. Μέσα στο gel τοποθετήθηκαν 3 κωνοειδείς όγκοι και 2 τριχοειδείς σωλήνες σε διαφορετικές θέσεις, όπως αυτές φαίνονται στην εικόνα του Σχήματος 7.5. Οι 5 όγκοι είναι γεμισμένοι με υδατικό διάλυμα $^{99\text{m}}\text{Tc}$ πυκνότητας 0.25mCi/ml ή 0.25mCi/cm³. Οι όγκοι και οι ενεργότητες των στερεών που τοποθετήθηκαν στο gel φαίνονται στον Πίνακα 7.3.

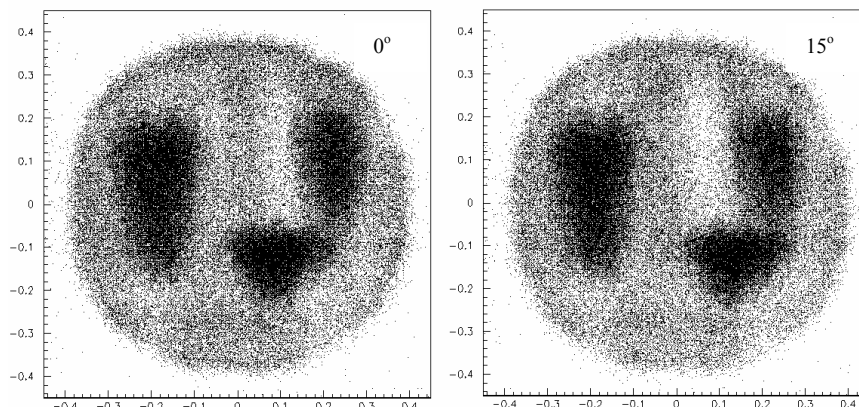
Στερεό	Όγκος V (cm ³)	A/V (mCi/cm ³)	Ενεργότητα A (mCi)
Τριχοειδής σωλήνας 1 & 2	0.073	0.25	0.018
Κωνοειδής 1	0.180	0.25	0.045
Κωνοειδής 2	0.417	0.25	0.104
Κωνοειδής 3	0.538	0.25	0.134

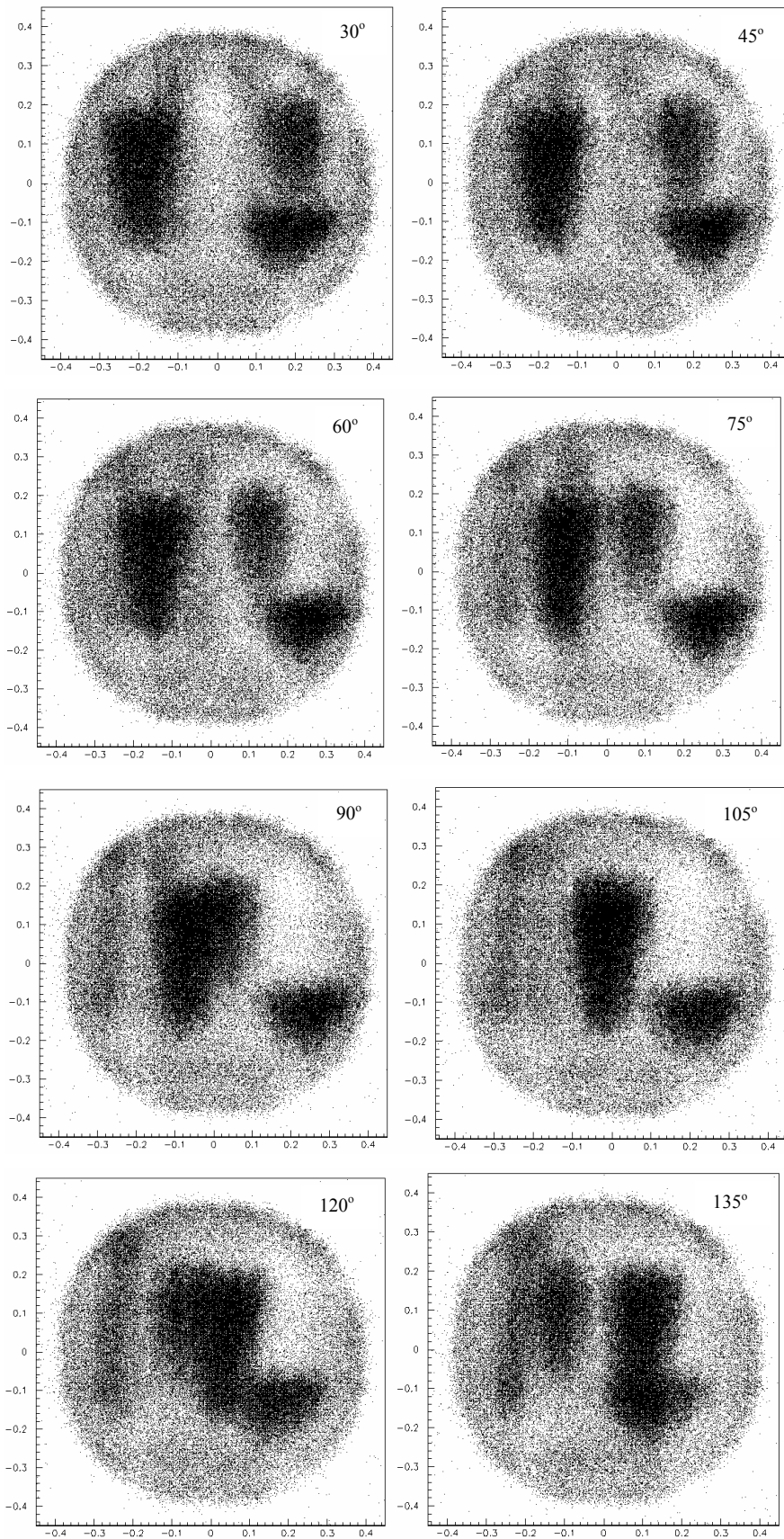
Πίνακας 7.3: Οι όγκοι και οι ενεργότητες των στερεών που τοποθετήθηκαν στο ομοίωμα του υδατικού gel.

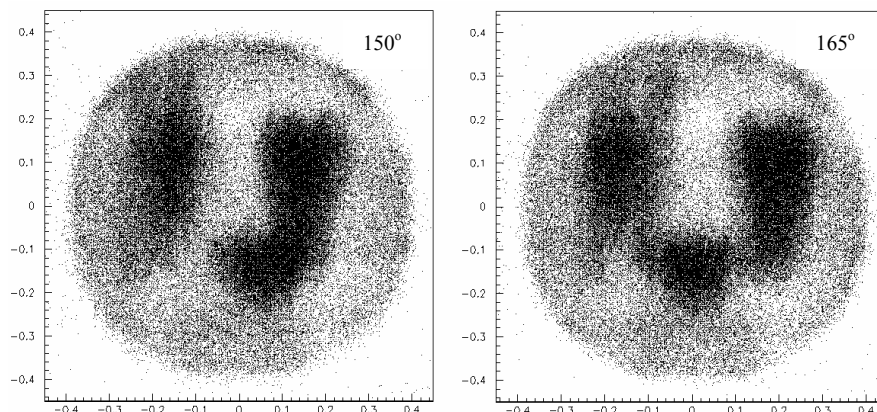


Σχήμα 7.5: Το ομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του πειράματος SPECT. Αριστερά είναι η προβολή του και δεξιά η άνοψη του στις οποίες φαίνεται η θέση των 5 ραδιενεργών όγκων που χρησιμοποιήθηκαν.

Η συνολική διάταξη τοποθετήθηκε σε γωνιομετρική βάση για τη δυνατή λήψη προβολικών εικόνων σε διαφορετικές γωνίες. Το πείραμα εκτελέστηκε για γωνίες λήψης δεδομένων από 0° έως 360° με βήμα 15° αλλά στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μέχρι τη γωνία των 180° εξαιτίας της συμμετρίας της διάταξης. Οι προβολικές εικόνες που λήφθηκαν (μετά από φιλτράρισμα των χαμηλο-ενεργειακών φωτονίων) για κάθε γωνία λήψης φαίνονται στις εικόνες του Σχήματος 7.6. Παρατηρείται ότι οι προς απεικόνιση όγκοι διακρίνονται στις προβολικές εικόνες σε διαφορετικές θέσεις ανάλογα με τη γωνία λήψης. Επιπλέον παρατηρείται ότι όταν ένας όγκος απομακρύνεται από την επιφάνεια του ανιχνευτή τόσο λιγότερο έντονα διακρίνεται λόγω της απορρόφησης των φωτονίων από το υλικό του ομοιώματος. Ακόμα και τα δύο τριχοειδή παρά την αρκετά χαμηλότερη ποσότητα ^{99m}Tc που περιέχουν διακρίνονται αμυδρά στις προβολικές εικόνες.



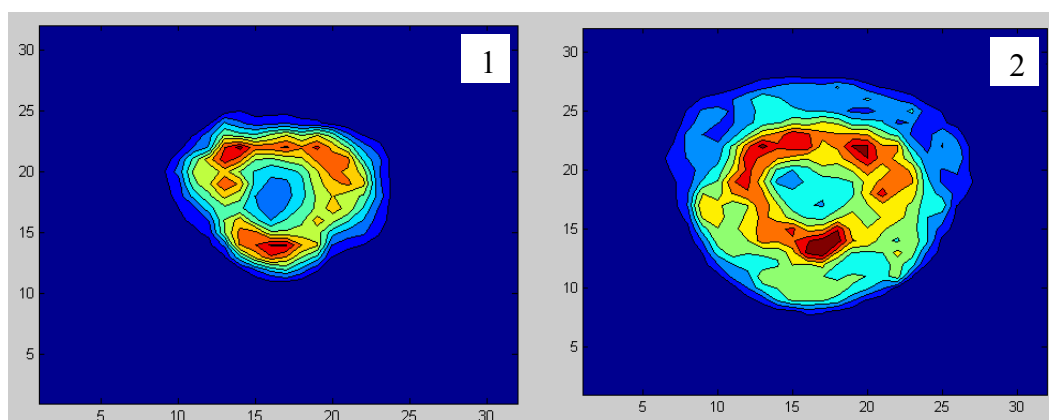


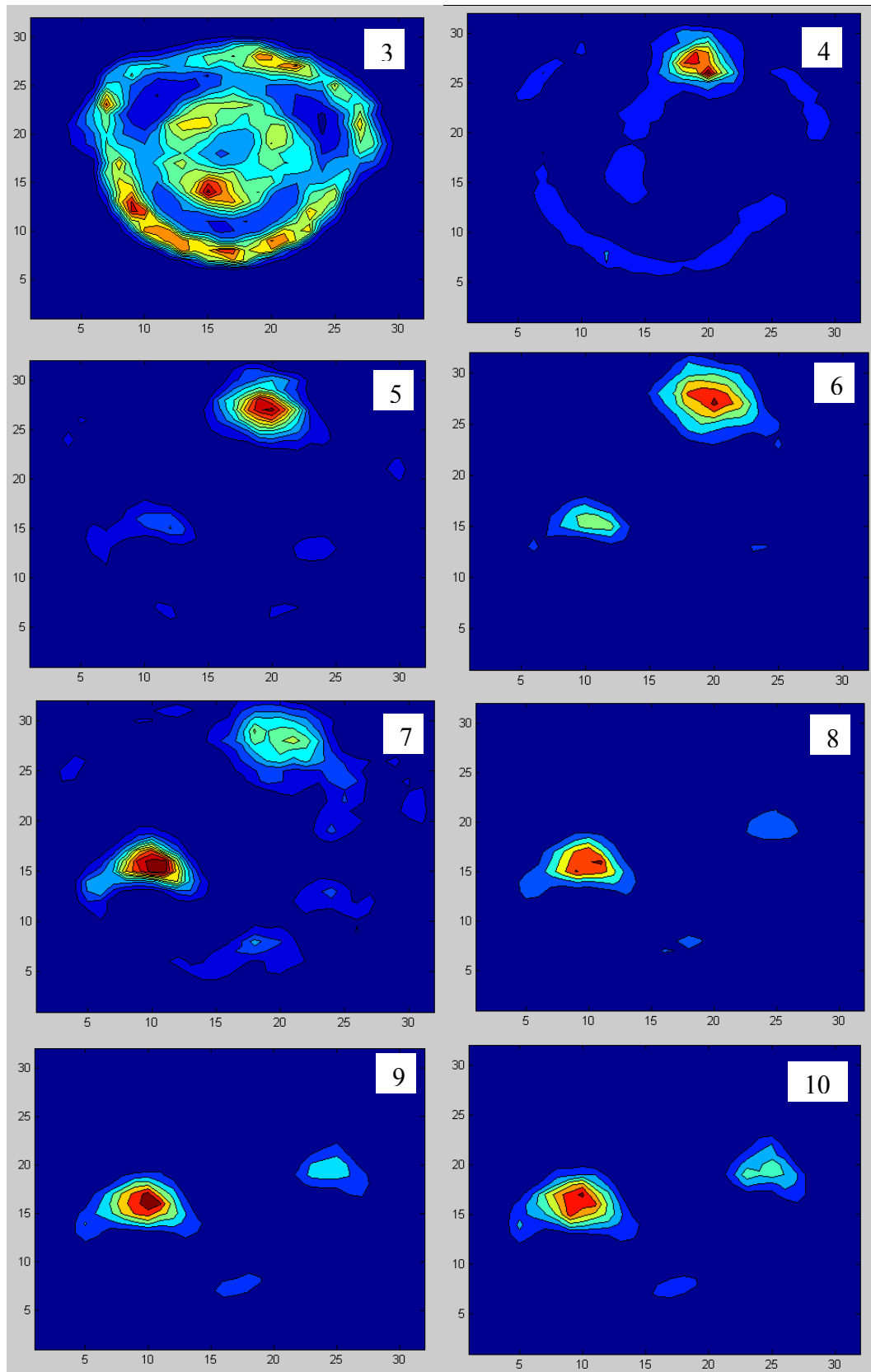


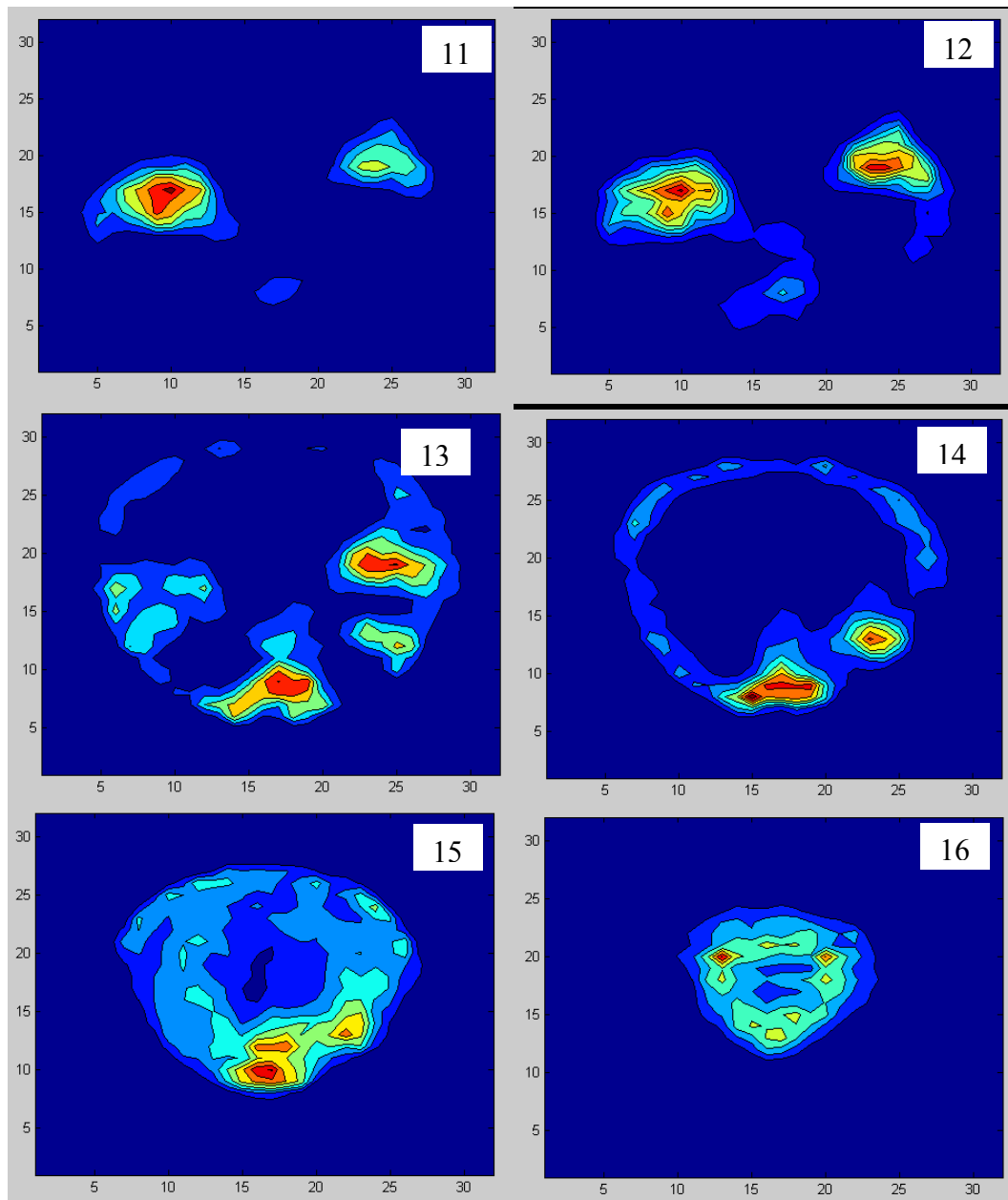
Σχήμα 7.6: Προβολικές εικόνες του ομοιώματος για διαφορετικές γωνίες λήψης κατά την εκτέλεση του πειράματος SPECT.

Παρά τη σκέδαση των φωτονίων στο υδατικό διάλυμα που παράγονται, ραδιενεργοί όγκοι της τάξης των $0.2-0.5\text{cm}^3$ με ενεργότητες μεγαλύτερες από 0.25mCi/cm^3 μπορούν πολύ εύκολα να απεικονιστούν από το σύστημα της γ -Κάμερα. Ακόμα και τα σωληνοειδή όγκοι μικρότερου του 0.1cm^3 (ενεργότητας τουλάχιστον 0.25mCi/cm^3) απεικονίζονται ελαφρώς και διαχωρίζονται από το υπόβαθρο του συστήματος και φαίνεται να αποτελούν το κάτω όριο ανίχνευσης του συστήματος, δηλαδή μικρότερες τιμές όγκου ή/και ενεργότητας δεν μπορούν να ανιχνευτούν από το σύστημα.

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανακατασκευής MLEM, ανακατασκευάστηκαν 16 τομογραφικά επίπεδα για 16 διαφορετικές ζώνες του οπτικού πεδίου της γ -Κάμερα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το οπτικό πεδίο του συστήματος είναι 50mm συμπεραίνεται ότι το πάχος κάθε τομογραφικού επίπεδο είναι περίπου 3mm. Τα επίπεδα αυτά (από κάτω προς τα πάνω σε ύψος) φαίνονται στις εικόνες του Σχήματος 7.7. Παρατηρείται ότι εξαιτίας της βαρελοειδούς χωρικής παραμόρφωσης τα επίπεδα στα άκρα του οπτικού πεδίου του συστήματος παρουσιάζονται συρρικνωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα στο κέντρο του.

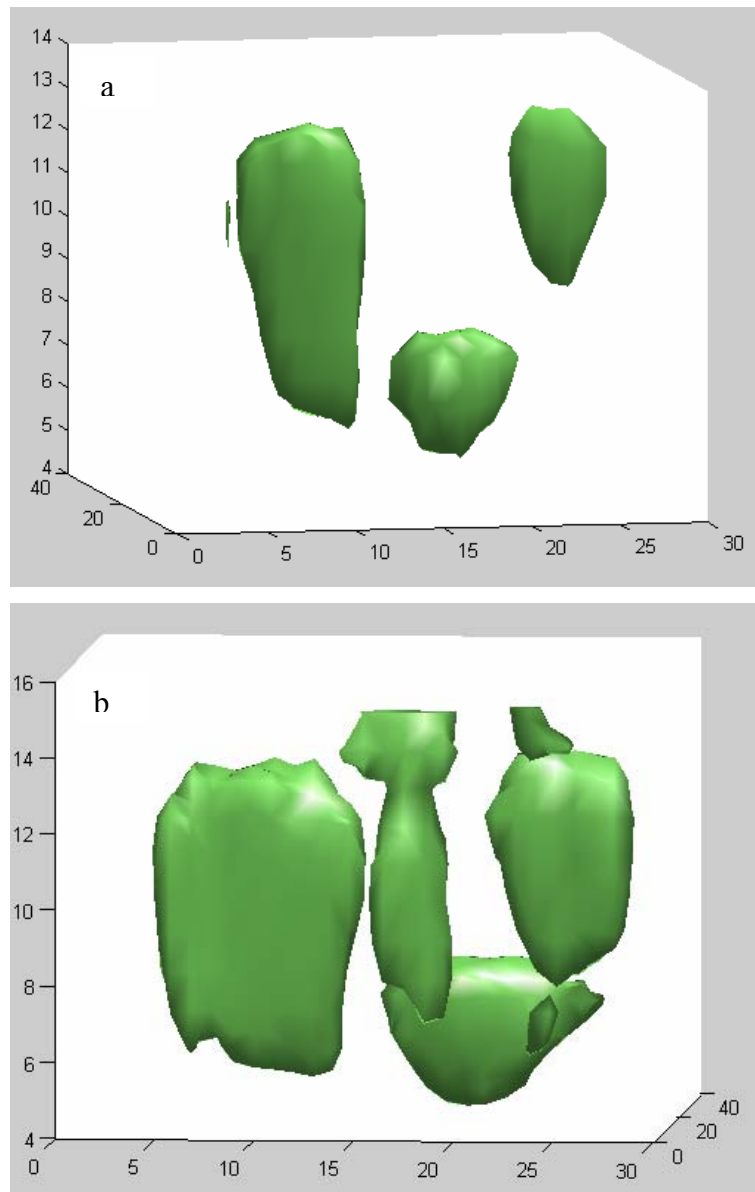






Σχήμα 7.7: Τα 16 τομογραφικά επίπεδα του ομοιώματος όπως ανακατασκευάστηκαν με τη μέθοδο MLEM. Το 1 αντιστοιχεί στο χαμηλότερο και το 16 στο υψηλότερο επίπεδο του οπτικού πεδίου.

Στις εικόνες του Σχήματος 7.8 φαίνεται την τρισδιάστατη ανακατασκευή των ραδιενεργών όγκων του ομοιώματος για δύο τιμές της ισοεπιφάνειας της έντασής τους, την 30% και την 12% (της μέγιστης έντασης) για τις εικόνες a και b του Σχήματος 7.8 αντίστοιχα. Στην ισοεπιφάνεια της 30% της μέγιστης έντασης διακρίνονται οι 3 κωνοειδής ραδιενεργοί όγκοι αλλά όχι οι 2 τριχοειδείς σωλήνες. Αυτό συμβαίνει γιατί η ενεργότητά τους είναι μικρότερη από αυτή των άλλων 3 μεγαλύτερων όγκων. Σε χαμηλότερη τιμή της ισοεπιφάνειας όπως η 12% παρατηρείται ότι διακρίνονται τα 2 τριχοειδή (το ένα περισσότερο και το άλλο λιγότερο καθαρά γιατί βρίσκεται πολύ κοντά σε έναν από τους 3 όγκους).

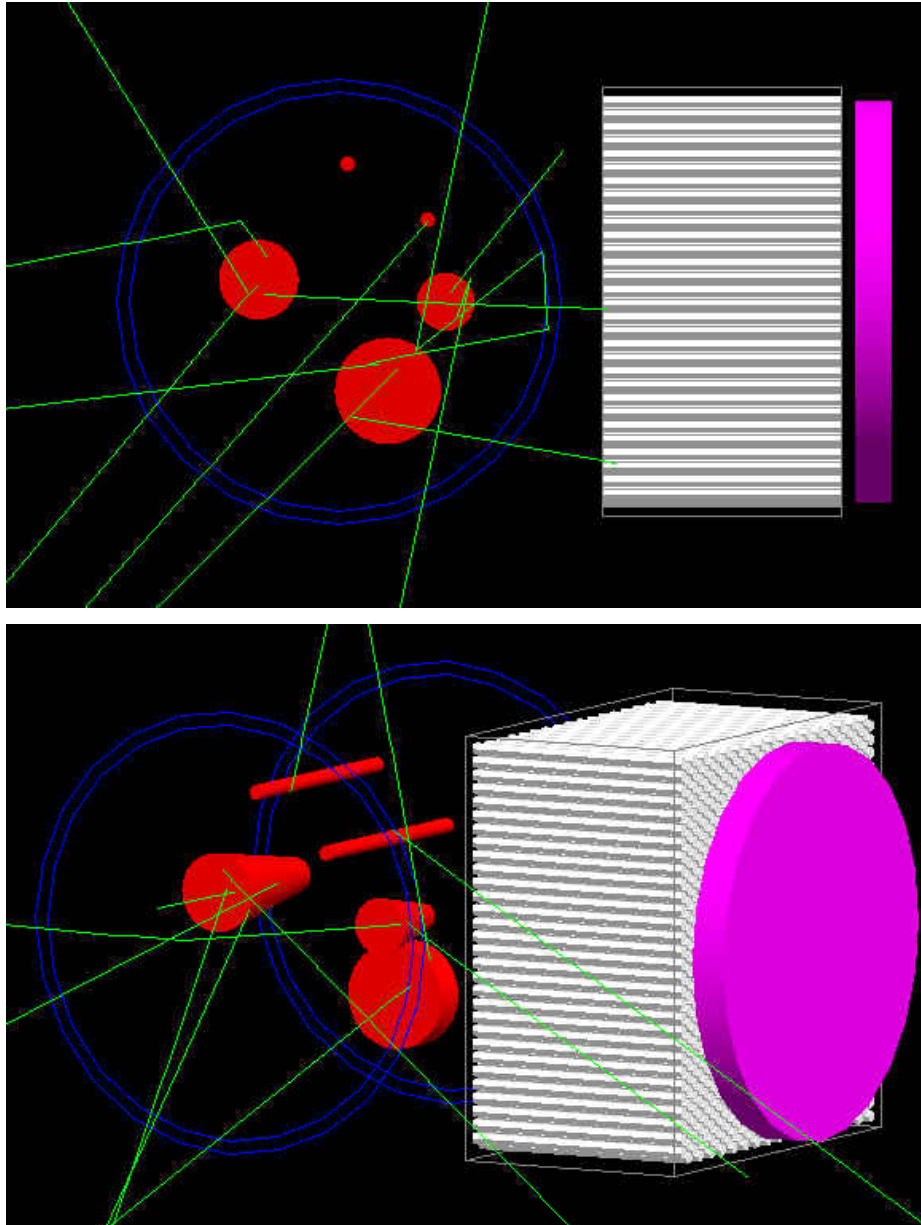


Σχήμα 7.8: Τρισδιάστατη ανακατασκευή του ομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα SPECT. Διακρίνεται: α) η 30% ισοεπιφάνεια και β) η 12% ισοεπιφάνεια.

Συμπεραίνεται ότι και σε τομογραφικό επίπεδο οι μεγαλύτεροι όγκοι των 0.20cm^3 μπορούν εύκολα να ανιχνευτούν και ανακατασκευαστούν από το σύστημα με τη βοήθεια κατάλληλων μεθόδων ανακατασκευής όπως η MLEM. Όμως για μικρούς όγκους της τάξης των τριχοειδών (μικρότερους του 0.1cm^3) απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επεξεργασία των δεδομένων για τον σωστό εντοπισμό τους (ελάχιστης πυκνότητας ενεργότητας $0.25\text{mCi}/\text{cm}^3$).

7.3 Πείραμα τύπου SPECT με προσομοίωση στο GATE

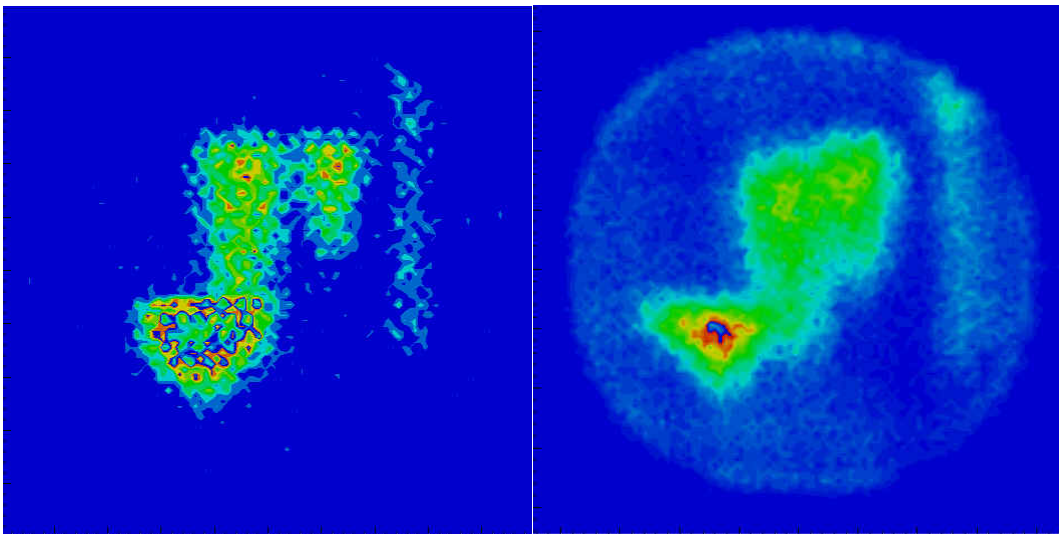
Το πείραμα SPECT που εκτελέστηκε στη προηγούμενη παράγραφο πραγματοποιήθηκε και σε επίπεδο προσομοίωσης με το πρόγραμμα GEANT4/GATE. Στα δεδομένα εισόδου περιγράφηκε με ακρίβεια η διάταξη του ομοιώματος, του κατευθυντήρα και του κρυστάλλου-σπινθηριστή που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πείραμα. Στις εικόνες του Σχήματος 7.9 φαίνονται φωτογραφίες (για διαφορετικές οπτικές γωνίες) της διάταξης της προσομοίωσης.



Σχήμα 7.9: Φωτογραφίες της διάταξης της προσομοίωσης του πειράματος SPECT.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, εκτελέστηκε το πείραμα στο πρόγραμμα GATE και αναπαράχθηκαν οι προβολικές εικόνες για τις διαφορετικές γωνίες λήψης δεδομένων. Στο

αριστερό τμήμα του Σχήματος 7.10 φαίνεται η προβολική εικόνα για γωνία λήψης δεδομένων 300° η οποία συγκρίνεται με την αντίστοιχη πειραματική εικόνα (Σχήμα 7.14 δεξιά).



Σχήμα 7.10: Προβολική εικόνα του ομοιώματος, για γωνία λήψης δεδομένων 300° , παραγόμενη από τη προσομοίωση (αριστερά) με την αντίστοιχη της πειραματική (δεξιά).

Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες (προσομοίωσης και πειραματική) παρατηρείται ότι η προσομοίωση έγινε επιτυχώς και τα αποτελέσματα της είναι σε πολύ καλή σύμπτωση με τα αντίστοιχα πειραματικά. Επιπλέον παρατηρούμε ότι στην εικόνα της προσομοίωσης να διακρίνονται οι οπές του κατευθυντήρα. Αυτό είναι μια ιδανική κατάσταση και συμβαίνει γιατί κατά την προσομοίωση δεν λαμβάνεται υπόψη η διάχυση των οπτικών φωτονίων στον κρύσταλλο όπως και οι διεργασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό του φωτοπολλαπλασιαστή για την παραγωγή ηλεκτρικού σήματος από τα οπτικά φωτόνια που προσπίπτουν σε αυτόν. Οι δύο αυτοί παράγοντες που αναφέρθηκαν και συμβαίνουν κατά τη διαδικασία του πειράματος χειροτερεύουν (δηλαδή αυξάνουν) τη χωρική διακριτική ικανότητα του συστήματος σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην διακρίνονται οι οπές του κατευθυντήρα στα πειραματικά αποτελέσματα.

Συνοψίζοντας αναφέρουμε ότι το πείραμα SPECT προσομοιώθηκε στον υπολογιστή με επιτυχία με τη χρήση του προγράμματος GEANT4/GATE με το οποίο είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης διαφόρων παραγόντων στην ποιότητα της παραγόμενης εικόνας του συστήματος γ-Κάμερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα – Μελλοντικοί Στόχοι

8.1 Συμπεράσματα

Κατά την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε και βελτιστοποιήθηκε το σύστημα γ-Κάμερα τόσο σε hardware όσο και σε software επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, χαρακτηρίστηκε το πιο σημαντικό τμήμα του συστήματος, ο χωρικά ευαίσθητος φωτοπολλαπλασιαστής (PSPMT). Μετρήθηκε το συλλεγόμενο φορτίο για διαφορετικές τιμές της διάρκειας παλμών ενός LED (διαφορετικές τιμές της διάρκειας παλμών του αντιστοιχούν σε ανίχνευση γ-φωτονίων διαφορετικής ενέργειας) με σκοπό τον έλεγχο της γραμμικότητας του PSPMT στην μέτρηση του συλλεγόμενου φορτίου. Βρέθηκε ότι η συλλογή του φορτίου από τον PSPMT είναι γραμμική εκτός από τις ακραίες τιμές διάρκειας των παλμών. Επίσης υπολογίστηκε η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του PSPMT για διαφορετικές τιμές της διάρκειας παλμών και βρέθηκε, όπως αναμενόταν και θεωρητικά, αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της διάρκειας των παλμών. Η χωρική διακριτική ικανότητα (FWHM) του PSPMT βρέθηκε της τάξης του 0.1mm που αντιστοιχεί και στο κάτω όριο του συστήματος και η οποία μένει σχεδόν σταθερή, παρουσιάζοντας κάποια τοπικά μέγιστα, σχεδόν σε ολόκληρο το οπτικό πεδίο του συστήματος. Η τιμή αυτή είναι πολύ καλή αφού είναι περίπου 10 φορές μικρότερη από την επιδιωκόμενη διακριτική ικανότητα του συστήματος σε πλήρη λειτουργία (με χρήση κρυστάλλου σπινθηρισμών και κατευθυντήρα). Η γραμμικότητα στην ανακατασκευή της θέσης επίσης ελέγχθηκε και βρέθηκε ότι αποκλίνει από αυτήν όσο μετακινείται η θέση του καταγραφόμενου γεγονότος από το κέντρο στα άκρα του οπτικού πεδίου του PSPMT. Η απόκλιση αυτή οδηγεί στην εμφάνιση της βαρελοειδούς παραμόρφωσης στις παραγόμενες προβολικές εικόνες.

Όσον αφορά τους κρυστάλλους σπινθηριστές, οι οποίοι διακρίνονται σε ομογενείς και διακριτοποιημένους, βρέθηκε μέσω της ακτινοβολήσης τους από λεπτή δέσμη ^{99m}Tc ότι οι διακριτοποιημένοι έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα εξαιτίας της κατευθυντηκότητας του φωτός μέσω του υλικού epoxy που εμποδίζει τη διάδοση των οπτικών φωτονίων στο εσωτερικό τους. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από οπτικές προσομοιώσεις που έγιναν με το λογισμικό DETECT2000. Από τις οπτικές προσομοιώσεις επίσης κατέστη σαφές ότι η κατανομή των οπτικών φωτονίων μπορεί να περιγραφεί, στη γενική περίπτωση, από το άθροισμα 2 γκαουσιανών κατανομών, μιας υπερέχουσας με μικρό εύρος (FWHM) και μιας ελάσσονος με μεγαλύτερο εύρος. Στην περίπτωση των διακριτοποιημένων κρυστάλλων αποδεικνύεται ότι το εύρος της υπερέχουσας γκαουσιανής κατανομής είναι μικρότερο από το αντίστοιχο εύρος στη περίπτωση των ομογενών κρυστάλλων.

Μελετώντας τις ιδιότητες των κατευθυντήρων χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοιώσεων ακτινοβολιών GATE ποσοτικοποιήθηκε η μεταβολή του αριθμού των ανιχνευόμενων φωτονίων μεταβάλλοντας την απόσταση των οπών και βρέθηκε το ποσοστό των ασκέδαστων (μόνο από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) και σκεδαζόμενων (από φαινόμενο Compton) φωτονίων σε κάθε περίπτωση. Υπολογίστηκε το ποσοστό τους, εντός και εκτός της ενεργής περιοχής η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις κάθε οπής του κατευθυντήρα. Βρέθηκε ότι ενώ εντός της ενεργής περιοχής ο αριθμός των ασκέδαστων φωτονίων είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο αριθμό των σκεδαζόμενων. Η αναλογία αυτή αντιστρέφεται στις περιοχές εκτός της ενεργής αυτής περιοχής στις οποίες τα σκεδαζόμενα φωτόνια είναι περίπου διπλάσια από τα ασκέδαστα. Σε κλινικό περιβάλλον το ποσοστό αυτό είναι πολύ ικανοποιητικό αλλά αναμένεται μεγαλύτερο πρακτικά εξαιτίας της ακτινοβολίας υποβάθρου που προέρχεται από τους γειτονικούς υγείς ιστούς. Τέλος προσομοιώνοντας στο πρόγραμμα GATE ένα εικονικό πείραμα με τριχοειδή, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του με πραγματικά πειραματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα σε πολύ μεγάλο βαθμό, γεγονός που σημαίνει ότι η διάταξη της γ-Κάμερα περιγράφηκε με επιτυχία στο πρόγραμμα GATE. Η προσομοίωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλα εικονικά πειράματα πριν εκτελεστούν από το πλήρες σύστημα του εργαστηρίου για μια πρώτη εκτίμηση τυχόν βελτιωτικών παρεμβάσεων στην πειραματική διάταξη.

Ο PSPMT που χρησιμοποιείται έχει ανοδικό πλέγμα στο οποίο εφαρμόζεται η τεχνική διαίρεσης φορτίου από την οποία παράγονται 2 σήματα σε κάθε άξονα. Για την ψηφιοποίηση των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η εμπορική κάρτα PCI 9812 της ADLink η οποία έχει 4 εισόδους και ψηφιοποιεί με ρυθμό έως 20MSamples/sec για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Αναπτύχθηκε κατάλληλο πρόγραμμα σε λογισμικό LabVIEW με το οποίο καταγράφονται σε αρχείο τα πειραματικά δεδομένα που ψηφιοποιούνται στην κάρτα με σκοπό την offline επεξεργασία τους. Επιπλέον κατά την εκτέλεση του προγράμματος υπάρχει η δυνατότητα της γραφικής ένδειξης των 4 καταγραφόμενων σημάτων, του πραγματικού ρυθμού καταγραφής και μιας πρώτης (χωρίς επεξεργασία των δεδομένων) online προβολικής εικόνας. Παρά το μειονέκτημα της ελάττωσης της ταχύτητας καταγραφής δεδομένων με τη μεθοδολογία αυτή επιτυγχάνεται πλήρης έλεγχος της καταγραφής από τον χρήστη και δεν εισάγεται επιπλέον θόρυβος στο σύστημα. Για τον ακριβέστερο υπολογισμό του ζητούμενου ελαχίστου σημείου κάθε σήματος, αναπτύχθηκε αλγόριθμος υπολογισμού του με πολυώνυμο παρεμβολής στηριζόμενο στα 3 καταγραφόμενα σημεία κάθε σήματος. Με τη χρήση του αλγορίθμου αυτού η διακριτική ικανότητα του συστήματος βελτιώνεται κατά ένα ποσοστό περίπου 2%. Έτσι η ανακατασκευή της θέσης ενός καταγραφόμενου γεγονότος επιτυγχάνεται από την σχετική διαφορά των δύο σημάτων σε κάθε άξονα, ενώ η ενέργεια υπολογίζεται από το συνολικό άθροισμα όλων των σημάτων.

Βελτιστοποιήθηκαν οι ενισχύσεις των 4 προενισχυτών με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εξαρτάται η ανακατασκευή της θέσης ενός γ -φωτονίου από την ενέργεια του. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η διακριτική ικανότητα του συστήματος, και βρέθηκε ίση με 0.95mm περίπου από 1.0mm που είχε μετρηθεί πριν από τη ρύθμιση, δηλαδή βελτιώθηκε κατά 5% περίπου.

Για τη διόρθωση της παρατηρούμενης βαρελοειδούς παραμόρφωσης που είναι περισσότερο έντονη στην περιφέρεια του οπτικού πεδίου των προβολικών εικόνων χρησιμοποιήθηκαν πίνακες δεδομένων από εικόνα βαθμονόμησης. Με τη βοήθεια των πινάκων αυτών διορθώνονται offline τα δεδομένα των προβολικών εικόνων εισάγοντας τα σε κατάλληλο πρόγραμμα FORTRAN που βασίζεται σε μεθόδους γραμμικής παρεμβολής δύο διαστάσεων. Μαζί με την αποκατάσταση της ομοιογένειας του συστήματος και την εφαρμογή σε δεδομένα πειράματος SPECT η χωρική διακριτική ικανότητα της τομογραφικής απεικόνισης βελτιώθηκε κατά 15% περίπου στις περιφερειακές περιοχές και λιγότερο στις κεντρικές. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι πριν τη χρήση της Κάμερας σε οποιοδήποτε περιβάλλον απαιτείται βαθμονόμηση του συστήματος με τη λήψη αντίστοιχης εικόνας βαθμονόμησης έχοντας τον ίδιο κρύσταλλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά την κλινική μέτρηση.

Βασίζόμενοι στα αποτελέσματα των οπτικών προσομοιώσεων με το DETECT2000, δηλαδή ότι η κατανομή των οπτικών φωτονίων μπορεί να περιγραφεί από άθροισμα 2 γκαουσιανών κατανομών, αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο ανακατασκευής της θέσης. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, από τα 4 καταγραφόμενα σήματα κάθε γεγονότος μπορεί να εξαχθεί ακριβής θέση της κατανομής των οπτικών φωτονίων γνωρίζοντας το εύρος της, το οποίο είναι χαρακτηριστικό για κάθε τύπο και μέγεθος κρυστάλλου. Ανακατασκευάζοντας τη θέση με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται αισθητά η χωρική διακριτική ικανότητα του συστήματος τόσο σε επίπεδο απεικόνισης προσπίπτοντος οπτικού φωτός παραγόμενο από LED στον PSPMT όσο και σε πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας το πλήρες σύστημα της γ -Κάμερα μαζί με κρύσταλλο και κατευθυντήρα. Επίσης βρέθηκε ότι η απόκλιση από τη γραμμικότητα στην απεικόνιση της θέσης που παρουσιαζόταν με τη χρήση του αλγορίθμου του κέντρου βάρους αποκαθίσταται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Με τη νέα μέθοδο ανακατασκευής της θέσης είναι δυνατή η χρήση ακόμα και ομογενών κρυστάλλων με την οποία η χωρική διακριτική ικανότητα φτάνει το 1.7mm (με απεικόνιση τριχοειδών σωλήνων) ενώ με τη μέθοδο του κέντρου βάρους η ανακατασκευή της θέσης δεν δίνει καθόλου καλά αποτελέσματα αφού τα τριχοειδή δεν διακρίνονται καθόλου. Παρόλα αυτά η διακριτική ικανότητα των ομογενών κρυστάλλων παραμένει σε χαμηλότερο επίπεδο από την αντίστοιχη τιμή των 0.95mm που επιτυγχάνεται με διακριτοποιημένο κρύσταλλο.

Κατά την τελική αξιολόγηση του συστήματος έγινε έλεγχος στο αν είναι δυνατό να απεικονιστούν από το πλήρες σύστημα της γ -Κάμερα μικροί γεωμετρικοί όγκοι (από 0.1 cm³

έως 0.5cm^3) χαμηλής ενεργότητας (0.25 mCi/cm^3) τοποθετημένοι σε υλικό gel με πυκνότητα ισοδύναμη του βιολογικού ιστού. Μετά από πείραμα τύπου SPECT τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά και έδειξαν ότι όγκοι μεγαλύτεροι των 0.2cm^3 μπορούν εύκολα να απεικονιστούν από το σύστημα (και σε προβολικό και σε τομογραφικό επίπεδο) ενώ όγκοι της τάξης των 0.1cm^3 θέλουν ιδιαίτερη προσοχή στην επεξεργασία των μετρήσεων για τον σωστό εντοπισμό τους. Συνεπώς το σύστημα είναι έτοιμο να αξιολογηθεί και να χρησιμοποιηθεί σε κλινικό περιβάλλον στο οποίο τα αποτελέσματα αναμένονται να είναι επιβαρημένα εξαιτίας της ακτινοβολίας υποβάθρου που υπάρχει σε κλινικές μετρήσεις (η οποία προέρχεται από τους γειτονικούς υγιείς ιστούς), αλλά όχι στις συνθήκες του πειράματος που εκτελέστηκε στο εργαστήριο.

8.2 Μελλοντικοί Στόχοι

Μελλοντικά, το πρωτότυπο σύστημα της γ-Κάμερα που αναπτύχθηκε αναμένεται να υποστεί τις αναγκαίες μηχανολογικές μετατροπές ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κλινικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται η αντίστοιχη μηχανολογική μελέτη και κατασκευή κατάλληλου φωτοστεγανού περιβλήματος το οποίο θα περιβάλλει την γ-Κάμερα και θα της δώσει τη δυνατότητα της εύκολης μεταφοράς της. Επιπλέον είναι απαραίτητος ο εξοπλισμός με DC-to-DC converter ο οποίος θα δίνει παροχή υψηλής τάσης στον φωτοπολλαπλασιαστή από την παροχή του δικτύου του υπολογιστή στον οποίο θα είναι εγκατεστημένο το DAQ. Τέλος η περαιτέρω αυτοματοποίηση του συστήματος είναι απαραίτητη για την απλότητα στη χρήση και λειτουργία του ακόμα και σε περιβάλλον υψηλών απαιτήσεων και αποτελεσματικής λειτουργίας (χειρουργικό περιβάλλον) όπου η πληροφορία της προβολικής εικόνας είναι αναντικατάστατη. Με τα παραπάνω βήματα το σύστημα θα είναι έτοιμο να αξιολογηθεί και να χρησιμοποιηθεί σε κλινικό περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

- [ADL03] ADLink Data Sheet, *PCI 9812/9810 20 MHz Simultaneous 4-CH Analog Input Cards*, (2003), ADLink Technology.
- [AGI03] Quick Start Tutorial, *Agilent 33220A 20MHz Function/Arbitrary Waveform Generator*, (2003), Agilent Technology.
- [ANG58] H.O. Anger, *Scintillation Camera*, Rev. Sci. Instrum. **29** (1958) 27-33.
- [ANT02] P. Antich *et al.*, *3D position readout from thick scintillators*, NIMA **480** (2002) 782-787.
- [BAK05] A. Bakkali *et al.*, *Monte Carlo simulation of discrete γ -ray detectors*, NIMA **545** (2005) 699-704.
- [BUV95] I. Buvat *et al.*, *A new correction method for gamma camera nonuniformity due to energy response variability*, Phys. Med. Biol. **40** (1995) 1357–1374.
- [CIN03] M.N. Cinti *et al.*, *The role of compact PSPMTs for image quality enhancement in nuclear medicine*, NIMA **505** (2003) 599-603.
- [CIO09] F. Ciocia *et al.*, *GEANT4 studies on the propagation and detection of scintillation light in long thin YAP crystals*, NIMA **600** (2009) 506-512.
- [COR09] Data Sheet and Specifications, *RJ-9 18 Turns Cermet Trimmers*, (2009), Coral Electronics.
- [DHA05] A.P. Dhanasopon *et al.*, *Scintillation Crystal Design Features for a Miniature Gamma Ray Camera*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **52** (2005) 1439-1446.
- [FER04] M.M. Fernandez *et al.*, *A flat-panel-based mini gamma camera for lymph nodes studies*, NIMA **527** (2004) 92-96.
- [FLY02] S-O Flykt and Carole Marmonier, *PHOTOMULTIPLIER TUBES: Principles & Applications*, 2002, Photonis, Brive, France.
- [GUN04] Donald L. Gunter, *Collimator Design for Nuclear Medicine*, Chapter 8 in *Emission Tomography: The Fundamentals of PET and SPECT*, Academic Press, 2004, ISBN: 0-12-744482-3.
- [GUN06] Donald L. Gunter, *Collimator characteristics and Design*, (R.E. Henkin *et al* eds, 2nd ed.), pp.96-124 in *Nuclear Medicine*, 2006, ISBN:0323028985.
- [HAM98] Hamamatsu Technical Data Sheet, *Position Sensitive Photomultiplier Tubes With Crossed Wired Anodes R2486 Series*, (1998), Hamamatsu Photonics.

- [HIG95] HIGZ User's Guide, *High Level Interface to Graphics and Zebra*, Long writeup Q120, (1995), Application Software Group, Computing and Networks Division, CERN Geneva, Switzerland.
- [ILT06] A. Iltis *et al.*, *Lanthanum halide scintillators: Properties and applications*, NIMA **563** (2006) 359-363.
- [JAN04] S Jan *et al.*, *GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT*, Phys. Med. Biol. **49** (2004) 4543–4561.
- [JEO04] Myung Hwan Jeong *et al.*, *Performance improvement of small gamma camera using NaI(Tl) plate and position sensitive photo-multiplier tubes*, Phys. Med. Biol. **49** (2004) 4961–4970.
- [JOH96] T.K. Johnson *et al.*, *A new method for the correction of gamma camera nonuniformity due to spatial distortion*, Phys. Med. Biol. **41** (1996) 2179–2188.
- [KIM00] Jong-Ho Kim *et al.*, *Development of Miniature scintillation camera using a NaI(Tl)scintillator and PSPMT for scitimmammography*, Phys. Med. Biol. **45** (2000) 3481–3488.
- [LER05] Ch.W. Lerche *et al.*, *Depth of γ -Ray Interaction Within Continuous Crystals from the Width of its Scintillation Light Distribution*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **52** (2005) 560-572.
- [LER09a] Ch.W. Lerche *et al.*, *Depth of interaction detection for γ -ray imaging*, NIMA **600** (2009) 624-634.
- [LER09b] Ch.W. Lerche *et al.*, *Maximum likelihood positioning for gamma-ray imaging detectors with depth of interaction measuring*, NIMA **604** (2009) 359-362.
- [LIN07] T.Ling, T.K. Lewellen and R.S. Miyaoka, *Depth of interaction decoding of a continuous crystal detector module*, Phys. Med. Biol. **52** (2007) 2213-2228.
- [LOU03] G.K. Loudos *et al.*, *A 3D high-resolution gamma camera for radiopharmaceutical studies with small animals*, Applied Radiation and Isotopes **58** (2003) 501–508.
- [MIK07] Μ. Μικέλη, «Μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατευθυντήρα στην εναισθησία και διακριτική ικανότητα της γ -Camera», Πτυχιακή Εργασία, 2007, Τμήμα Φυσικής Πανεπιστημίου Αθηνών.
- [MIK08] M. Mikeli *et al.*, *A New Position Reconstruction Method for Position Sensitive Photomultipliers*, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, M10-104 (2008) 4736-4741.
- [MIK09] M.Mikeli, D. Thanasas and E. Stiliaris, *Collimator Study of γ -Camera using GATE*, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, M13-360 (2009) 3931-3935.

- [MIK10] Μ. Μικέλη, *Ανακατασκευή Προβολικής Εικόνας Συστήματος γ -Camera με Χρήση Ομογενών Κρυστάλλων Σπινθηρισμού*, Διπλωματική Εργασία ΜΔΕ, 2010, Τμήμα Φυσικής Πανεπιστημίου Αθηνών.
- [MOI00] C. Moisan, F. Cayouet, G. McDonald, *DETECT 2000 User's Guide*.
- [PAN97] R. Pani *et al.*, *Scintillating array gamma camera for clinical use*, NIMA **392** (1997) 295-298.
- [PAN02] R. Pani *et al.*, *A compact gamma ray imager for oncology*, NIMA **477** (2002) 509-513.
- [PAN03] R. Pani *et al.*, *A novel compact gamma camera based on flat panel PMT*, NIMA **513** (2003) 36-41.
- [PAN04] R. Pani *et al.*, *The "IMI" project: an advanced gamma camera for scintimammography*, NIMA **518** (2004) 380-381.
- [PAN06] R. Pani *et al.*, *Lanthanum scintillation crystals for gamma ray imaging*, NIMA **567** (2006) 294-297.
- [POL06] A. Polychronopoulou *et al.*, *Position and Energy Resolution of a γ -Camera based on Position Sensitive Photomultiplier Tube*, 16th Hellenic Nuclear Physics Symposium, University of Athens, Book of Proceedings (2006) 172-179.
- [POL09] A. Polychronopoulou *et al.*, *Study of the optical properties of both continuous and pixelated scintillation crystals*, JINST **4** (2009) P09002.
- [POR02] E. Porras *et al.*, *Portable gamma camera for medical applications*, NIMA **486** (2002) 186-190.
- [PRE95] T.H. Prettyman, R.A. Cole, R.J. Estep, G.A. Sheppard, *A maximum-likelihood reconstruction algorithm for tomographic gamma-ray non destructive assay*, NIMA **356** (1995) 470-475.
- [SAN06] F. Sanchez *et al.*, *Performance tests of two portable mini gamma cameras for medical applications*, Med. Phys. **33** (2006) 4210-4220.
- [SCA03] R. Scafe *et al.*, *Light output spatial distributions of CsI(Tl) scintillation arrays for gamma-rays imaging*, NIMA **497** (2003) 249-254.
- [SCA04] R. Scafe *et al.*, *A Study of Intrinsic Crystal-Pixel Light-Output Spread for Discrete Scintigraphic Imagers Modeling*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **51** (2004) 80-84.

[**THA08**] D. Thanasas *et al.*, *Correcting Spatial Distortion and non-Uniformity in Planar Images from γ -Camera Systems*, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, M06-19 (2008) 3711-3714.

[**THA09a**] D. Thanasas *et al.*, *A Correction Method of the Spatial Distortion in Planar Images from γ -Camera Systems*, JINST **4** (2009) P06012.

[**THA09b**] D. Thanasas *et al.*, *An analytical Position Correction Algorithm for γ -Camera Planar Images from Resistive Chain Readouts*, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, M05-208 (2009) 2766-2769.

[**TRO07**] C. Trotta *et al.*, *New high spatial resolution portable camera in medical imaging*, NIMA **577** (2007) 604-610.

[**ZEN06**] T. Zeniya *et al.*, *Use of a compact pixelated gamma camera for small animal pinhole SPECT imaging*, Annals of Nuclear Medicine **20** (2006) 409–416.